



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. Ксенович
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

Т. В. Арбузова

**5 (59)
Май
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

- Рыбин А. А., Бухаров С. В., Червяков А. А. — Технологическая оптимизация дилатонных механизмов формирования работоспособности термопластичных композитов при ударных нагрузках 5
- Хорев А. И. — Основные направления создания высокопрочных и высоконадежных композиционных материалов на основе титановых сплавов 9

ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- Жеребцов С. Н., Иванов А. Л., Племенюк А. А. — Электрошлаковое литье деталей из конструкционных сталей для энергоблоков 16
- Абрамова Н. Б. — Исследование физико-механических свойств бескислородной меди 18

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

- Киселев Е. С., Степчева З. В. — Эффективность применения газообразных СОТС в процессе ультразвукового алмазного выглаживания 21
- Иванов В. С. — Векторное моделирование способов многолезвийной обработки. 24

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- Шумячер В. М., Кадильников А. В. — Влияние формы поверхности шлифовального круга и ориентации абразивного зерна в связке на начало процесса стружкообразования 29
- Чирков Г. В. — Основные закономерности, влияющие на процесс пропитки абразивных кругов. 33

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

- Богдановский В. А., Гавва В. М., Махлин Н. М., Чередник А. Д., Коротынский А. Е., Мужиченко А. Ф., Воробьев К. А., Тархов С. Ф., Федотов В. А. — Компьютеризированный малоамперный дуговой тренажер сварщика 37

ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

- Моргунов А. П., Блесман А. И., Калекин В. С., Ласица А. М., Чуранкин В. Г. — Технологическое обеспечение эффективности и надежности работы машин и агрегатов компрессорной техники 40

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ

- Степанов И. Б. — Аксиально-симметричные фильтры жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции 44

МЕТРОЛОГИЯ

- Куликов С. Н., Баранов П. Н. — Влияние погрешности квантования аналого-цифровыми преобразователями на точность алгоритмов вычисления параметров динамического дисбаланса при уравнивании роторов 52

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ

- Розин А. Я. — Применение показателя проникающей способности испытательных сред и жидких грузов для оценки пороговой чувствительности контроля локальной герметичности 56
- Боченин В. И. — Радиоизотопный способ контроля содержания перлита в износостойком чугуна 61

АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Белякова М. С., Косов М. Г. — Моделирование поверхностей с учетом отклонений их формы и расположения, определяемых техническими требованиями 64

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Хромченко Ф. А. — Техническая диагностика сварных соединений трубопроводов. Ч. 1. Сварные соединения трубопроводов I категории 66

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА

- Единая система защиты от коррозии и старения. Межоперационная противокоррозионная защита. Общие требования (ГОСТ Р 9.518—2006). 71

ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЯ

- Капустин О. Е., Вышемирский Е. М., Севостьянов С. П. — Повышение безопасности и качества процессов газовой резки и сварки в системе предприятий ОАО "Газпром" 77

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Федоров В. К., Бендерский Г. П., Белевцев А. М. — О некоторых принципах и особенностях организации инновационной деятельности в современном машиностроении 80
- Расторгуев Г. А. — Организационно-технологическая надежность машиностроительного производства. 82
- Борисов А. К. — Управление инновационной деятельностью приборостроительного предприятия 85

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

- Потапова Г. С. — Содержание зарубежных журналов 87

ИНФОРМАЦИЯ

- Суслов Ан. А. — 3-я Специализированная выставка нанотехнологий и наноматериалов "NTMEX—2006" ... 90
- Добринский Е. С. — 8-я Международная автомобильная конференция "Двигатели для российских автомобилей" 94
- Иванов А. Н. — Международная выставка "Технологии промышленной окраски" 94
- Иванов А. Н. — 12-я Международная специализированная выставка "Металлэкспо—2006" 98



TEKHOLOGIYA 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
T. V. Arbuzova

**5 (59)
May
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

- Rybin A. A., Bukharov S. V., Chervyakov A. A. — Process optimization of the thermoplastic composite workability formation dilatation mechanism at impact load 5
- Khorev A. I. — Basic guidelines of developing titanium-based high-strength and highly reliable composite materials 9

BLANK PRODUCTION

- Zherebtsov S. N., Ivanov A. I., Plemenjuk A. A. — Structural steel electroslag casting for the heat and power units components. 16
- Abramova N. B. — Study of the oxygen-free copper mechanical properties. 18

FORMING TECHNOLOGIES

- Kiseliov Ye. S., Stepcheva Z. V. — Gaseous technological coolant application efficiency at ultrasonic adamantite burnishing. 21
- Ivanov V. S. — Multiple-edge machining procedures vector modeling. 24

TOOLING PRODUCTION

- Shumyacher V. M., Kadilnikov A. V. — Effect of surface form and abrasive grain orientation at the beginning of the chips-making process at grinding 29
- Chirkov G. V. — Basic mechanisms influencing impregnation of the abrasive wheel 33

PERMANENT JOINTS PRODUCTION TECHNOLOGY

- Bogdanovsky V. A., Gavva V. M., Makhlin N. M., Cherednik A. D., Korotynsky A. Ye., Muzhichenko A. F., Vorobiov K. A., Tarkhov S. F., Fedotov V. A. — Welders' computeraided low-amperage arc training equipment. 37

MODIFYING PROCESSES OF MACHINE PARTS SURFACES

- Morgunov A. P., Blesman A. I., Kalekin V. S., Lasitsa A. M., Churankin B. G. — Technological support of the compressor house machines and units effective and reliable operation 40

SPECIAL TECHNOLOGIES

- Stepanov I. B. — Axial-symmetrical jalousie-type filter for micro-dripping fraction cleaning plasma of the vacuum-arc discharge. 44

METROLOGY

- Kulikov S. N., Baranov P. N. — ADC quantizing error effect on the accuracy of the dynamic unbalance parameters computational procedure at rotor counterbalancing 52

TECHNICAL DIAGNOSTICS, NONDESTRUCTIVE CHECK-AND-TESTING METHODS

- Rozinov A. Ya. — Application of the testing medium and liquid consignment penetration capability index to estimate threshold sensitivity of the local tightness control 56
- Bochenin V. I. — Radioisotope testing of the pearlite content in the hardwearing cast iron 61

PROCESSES AUTOMATION AND COMPUTERIZATION

- Belyakova M. S., Kosov M. G. — Surface simulation considering form and displacement deflections determined by the technical requirements 64

POWER INDUSTRY

- Khromchenko F. A. — Pipeline welded joints technical diagnostics. Part 1. Welded joints of the 1st class pipelines 66

STANDARDIZATION, CERTIFICATION, QUALITY SYSTEMS

- Corrosion and ageing prevention uniform system. Inter-operational anticorrosive protection 71

LABOUR PROTECTION AND ECOLOGY

- Kapustin O. Ye., Vyshemirsky Ye. M., Sevostyanov S. P. — Gas cutting and welding safety and quality improvement in the "Gasprom" JSC plant system 77

ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION

- Fedorov V. K., Bendersky G. P., Belevtsev A. M. — On some principles and features of innovative activity organization in the present-day engineering industry 80
- Rastorguyev G. A. — Managerial and technological reliability of the machinery production. 82
- Borisov A. K. — Managing innovative activities at an instrument-making plant 85

FOREIGN EXPERIENCE

- Potapova G. S. — Foreign journals contents 87

INFORMATION

- Suslov An. A. — The 3rd Specialized exhibition of nano-technologies and nano-materials "NTMEX'2006" 90
- Dobrinsky Ye. S. — The 8th International Automotive Conference 94
- Ivanov A. N. — The International exhibition "Industrial coating technologies" 94
- Ivanov A. N. — The 12th International specialized exhibition "MetalExpo—2006" 98
-

А. А. РЫБИН, д-р техн. наук, С. В. БУХАРОВ, д-р техн. наук, А. А. ЧЕРВЯКОВ, инж.
 «МАТИ» — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Технологическая оптимизация дилатонных механизмов формирования работоспособности термопластичных композитов при ударных нагрузках

В работе [1] использован метод энергосиловой оценки эффектов влияния структурных факторов наполнения полиамидной матрицы ПА6-211 короткими стекловолокнами на предельные механические свойства полиамидных композитов при ударном сжатии со скоростью деформации $\dot{\varepsilon} \approx 250 \text{ с}^{-1}$. В этой работе проанализированы традиционные характеристики динамических свойств термопластичных композитов. Результаты современного подхода к определению более достоверных уровней параметров динамической работоспособности этого класса материалов приведены в работах [2, 3]. В этих работах проиллюстрированы возможности дилатонного подхода [4] к анализу механизмов множественного разрушения полимеров на кластерных очагах молекулярного уровня.

Экспериментальные результаты оценок механических свойств композитов рассматриваемого класса получены на образцах, изготовленных методом литья под давлением на машине "Мопомат" по штатному режиму литья, обычно применяемому для формирования изделий из наполненных полиамидов.

В данной работе проведен сопоставительный анализ энергосиловых показателей предельных характеристик и характеристик дилатонных уровней достоверной работоспособности наполненных полиамидов в зависимости от режимных параметров литья под давлением модельных образцов, а также анализ эффектов влияния основных режимных параметров литья под давлением образцов из полиамидных компози-

тов на достижимые уровни показателей критических состояний (предразрушающих) дилатонных зон в полимерах [3].

Исследовали полиамидные материалы, наполненные короткими стеклянными волокнами (СВ) длиной l : ПА6-211 + СВ ($l \sim 1 \text{ мм}$; 32 %); ПА6-211 + СВ ($l \sim 10 \text{ мм}$; 16 %); ПА6-211 + СВ ($l \sim 10 \text{ мм}$; 20 %); ПА6-211 + СВ ($l \sim 10 \text{ мм}$; 33 %).

Варьировали следующие параметры литья: давление впрыска расплава в форму (54—88 МПа), время выдержки под давлением (5—30 с), время охлаждения в форме (10—60 с).

Ударные испытания призматических образцов с размерами $12 \times 6 \times 4 \text{ мм}$, изготовленных по вариabельным технологическим режимам литья, проведены методами, описанными в работе [1]. Скорость деформации образцов при одноосном ударном сжатии составляла около 250 с^{-1} , коэффициент вариации результатов измерений по уровням напряжений около 8—12 %, по длительностям импульсов динамических усилий в образцах около 10—16 %.

Оценка предельных механических свойств полимеров на основе общей теории вязко-упругости (сплошная среда) и дилатонно-кластерного ограничения пре-

дельной работоспособности материалов ("дилатонное" насыщение) схематически приведена на рис. 1. Под схемами динамического деформирования рассматриваемых сред импульсной нагрузкой $\sigma(t)$ упрощенно проиллюстрированы способы модельного описания деформированных ($U(t)$ и $\varepsilon(t)$) напряженных состояний материальных объектов этих сред. Для случая, приведенного на рис. 1, а, рассмотрен простейший одноосный процесс деформирования среды по закону Больцмана—Вольтерра, когда зонные динамические относительные деформации вычисляются по соотношению Коши, а вязко-упругие свойства полимера учитывают с помощью функции релаксации $\psi(\theta)$, выраженной через функцию спектра времен релаксации $H(\tau)$:

$$\sigma = \int_0^t \psi(t-\tau) \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial \tau} d\tau;$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}; \quad \varepsilon = \frac{\partial u}{\partial t};$$

$$\psi(\theta) = \int_0^\infty \frac{H(\tau)}{\tau} e^{-\frac{\theta}{\tau}} d\tau.$$

Имеется опыт [6] эффективно-го построения функционалов памяти σ над ε с помощью развитого

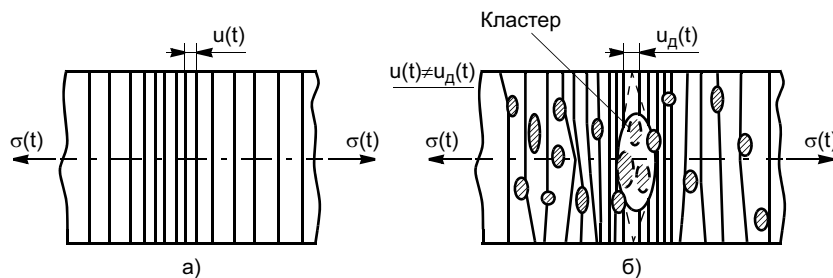


Рис. 1. Сопоставление "сплошной" среды (а) и среды с неоднородностями "дилатонного" насыщения (б)

аппарата ряда Фреше интегралов вырастающей кратности:

$$\sigma(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \int_0^t \dots \int_0^t K^{(n)}(t, \tau) \times \\ \times \prod_{m=1}^n \varepsilon(\tau_m) d\tau_m.$$

Для случая, приведенного на рис. 1, б, анализ дилатонной модели зарождения микродефектов [4] приводит к кинетическому уравнению для деформации ε межатомных связей в дилатонах, отображенных на схеме заштрихованными зонами:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\bar{v}}{\Lambda} (\varepsilon - \bar{\varepsilon}) \left[\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{кр}} (1 - 3\Gamma\varepsilon) - 1 \right]; \\ \varepsilon_{кр} = \frac{a(1 - 3\Gamma\bar{\varepsilon})}{3\Gamma\Lambda}.$$

Здесь $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t}$ — скорость деформации межатомных связей в молекулах; ε — полная деформация связей в дилатоне; $\bar{\varepsilon}$ — превышение деформации в дилатоне в сравнении со средней деформацией деформированной среды вне зон дилатонов; $\varepsilon_{кр}$ — критическая деформация химических связей в дилатоне; Γ — параметр Грюнайзера; Λ — длина свободного пробега фононов; $\bar{v}$ — скорость в возмущенной среде. В работе [5] разработана математическая модель формирования дилатонно-кластерных зон согласно схеме (см. рис. 1, б) и предложен функционал работоспособности Φ_d , позволяющий устанавливать временные моменты динамического отклика среды на высокоскоростное механическое воздействие, когда дилатонное насыщение в некоторых объемах среды (здесь названы термином "кластер" [4]) достигает разрушающего состояния:

$$\Phi_d = \Phi(\dot{\varepsilon}, T_{эф}, \Lambda, \Gamma, \bar{\varepsilon} \dots).$$

С этого момента среда или очень быстро разрушается, или эволюция разрушающих процессов в среде резко ускоряется.

Контролирующий кинетику дилатонов функционал Φ_d отмечает практически для всех материалов начало развития дилатонных структур на очень ранних стадиях деформирования. По этой причине необходимы формы функционалов $\sigma(t)$, объективно учитывающих возмущающее воздействие полей дилатонов на деформированные процессы в сплошных средах. Кроме того, почти всегда путем расчетов на базе специализированных экспериментальных измерений можно установить критическую временную точку начала кластерного разрушения материала по схеме рис. 1, в. Проведенные исследования позволили установить [5], что такого рода критические точки практически не совпадают с предельными точками, выявляемыми по схеме рис. 1, а. С эксплуатационной точки зрения, очевидно, что наибольший интерес представляют критические точки систем с "дилатонным" насыщением, так как именно на этих состояниях материалов наиболее возможны "непредвиденные" разрушения изделий.

Вместе с тем очевидно, что кинетика возбуждения и развития дилатонных структур определяется состоянием молекулярной структуры материала, формируемой технологией изготовления элементов из полимерных материалов. И в этом плане обретает особое значение тщательность отработки оптимальных технологических режимов формования изделий. Сопоставление энергосиловых диаграмм [1] предельных и критических (дилатонных) уровней параметров свойств напыленной композиции ПА6-211 приведено на рис. 2. Диаграммы получены при вариации давления впрыска расплава в пределах 540—880 МПа при $T_{исп} = 288$ К; A_B — уровни предельных энергоемкостей разрушения композиций ("сплошная среда"), A_d — уровни критических параметров (среда с "дилатонным" насыщением).

Построение данных диаграмм приведено в работе [1]. Цифры у графических точек указывают на экспериментально реализуемые уровни технологического параметра литья. Таким образом, приведенные диаграммы дают полную информацию о достижимых уровнях параметров A_B и A_d , а также, что очень важно, о направлении оптимизации этих параметров. Последнее обстоятельство отмечено стрелками на обеих диаграммах.

Из анализа данных рис. 2 следует, что:

— уровни критических энергоемкостей A_d значительно меньше предельных уровней A_B ;

— направления оптимизации параметров A_d и A_B не совпадают, в частности, наибольшее значение параметра A_B достигается на уровне технологического параметра 690 МПа, а параметра A_d — на значении параметра 750 МПа;

— не совпадают также оптимальные уровни предельных и критических значений соответственных параметров по разрушающим напряжениям σ_B (традиционно определяемых) и σ_d , соответствующих достижению рез-

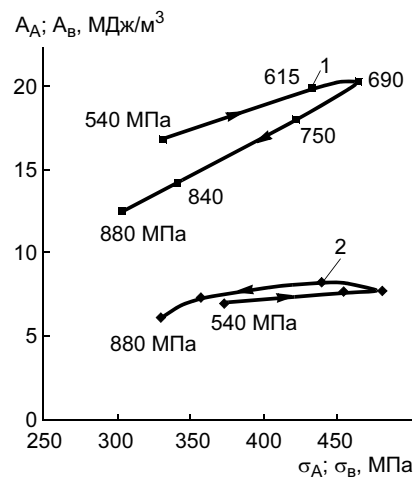


Рис. 2. Энергосиловые диаграммы предельных 1 и дилатонно-критических 2 уровней параметров свойств композиции в вариациях давления впрыска расплава для полиамида ПА6-211 + СВ ($l \approx 1$ мм, 32 %): 1 — σ_B — A_B ; 2 — σ_d — A_d

кой активации кластерных механизмов разрушения.

Конкретизированные для рассмотренного технологического параметра литья установленные факты также проявляются и в вариациях других ранее названных технологических параметров при формировании отливок из приведенных на рис. 2 полиамидных композиций. Обобщенный анализ энергосиловых зависимостей рассмотренного типа для других названных композиций, отличающихся другой структурой наполнения, в целом выделяет перечисленные для рассмотренной композиции особенности соотношения и силовых (σ), и энергетических (A) параметров при варьировании режимов литья в указанных числовых пределах. Однако все эти графические зависимости при всей их расширенной информативности все-таки не дают углубленного анализа физической стороны принципов формирования реальных (рассмотренных) уровней характеристических параметров свойств при динамических нагрузках.

Повышению стойкости полимерных материалов против высокоскоростных воздействий, в частности, способствуют физические процессы, протекающие на атомарно-молекулярном уровне с высокой скоростью (частотой) [4, 7]. В работах [1, 3] введены параметры, дающие численную оценку скорости поглощения энергии импульсного воздействия испытываемым образцом материала:

— параметр $\frac{dA}{dt}$, характеризующий скорость поглощения энергии, идущей на развитие внутренних деформационных процессов в материале;

— параметр t_A , характеризующий особые временные точки актового времени, в которых достигаются выраженные экстремумы параметра $\frac{dA}{dt}$. Особый смысл

точек t_A теоретически обоснован в работе [5].

Проведено исследование эффектов влияния структуры наполнения ПА6-211 и варьируемых па-

раметров технологии литья под давлением на достижимые уровни параметров $\frac{dA}{dt}$ и t_A .

На рис. 3 систематизированы данные об изменении скоростных параметров энергопоглощения dA/dt и t_A рассматриваемых полиамидных композиций при варьировании давления впрыска расплава в форму, на рис. 4 — при варьировании времени выдержки под давлением, на рис. 5 — при варьировании времени охлаждения в форме.

В работе [5] показано, что в моменты времени t_A импульсного нагружения материалов возникает экстремальная точка по значениям параметра $\frac{dA}{dt}$. Проведен-

ный анализ термодинамической эволюции химических связей в областях дилатонов показал, в частности, что к времени актового процесса, близкому к t_A , достигается критическое состояние большинства дилатонов, возникших в различных кластерных областях. Целесообразно учитывать временные точки t_A и соответствующие им экстремальные

уровни $\frac{dA}{dt}$ как временные и энергетические уровни начала активации кластерных разрушительных процессов в молекулярных структурах материалов. Ввиду сказанного представляется целесообразным учет оптимальных уровней

параметров $\frac{dA}{dt}$ и t_A при отработке оптимальных режимов литья изделий из полимерных материалов, предназначенных для эксплуатации в условиях скоростных динамических нагрузок.

Обратимся к анализу данных, приведенных на рис. 3—5, с практической точки зрения оценки реальной работоспособности полиамидных композиций. В этом плане очевидна необходимость максимально высоких уровней $\frac{dA}{dt}$.

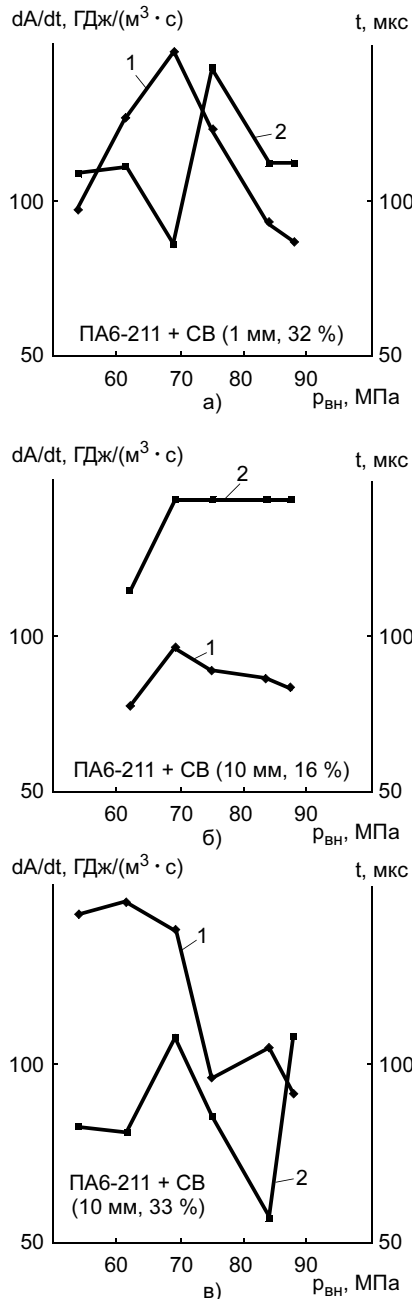


Рис. 3. Зависимость скоростных параметров энергопоглощения композиций на основе стеклонеполненного ПА6-211 от давления впрыска расплава в форму: 1 — экстремальное значение скорости поглощения энергии воздействия в момент достижения критического состояния дилатона; 2 — время достижения экстремального значения параметра dA/dt

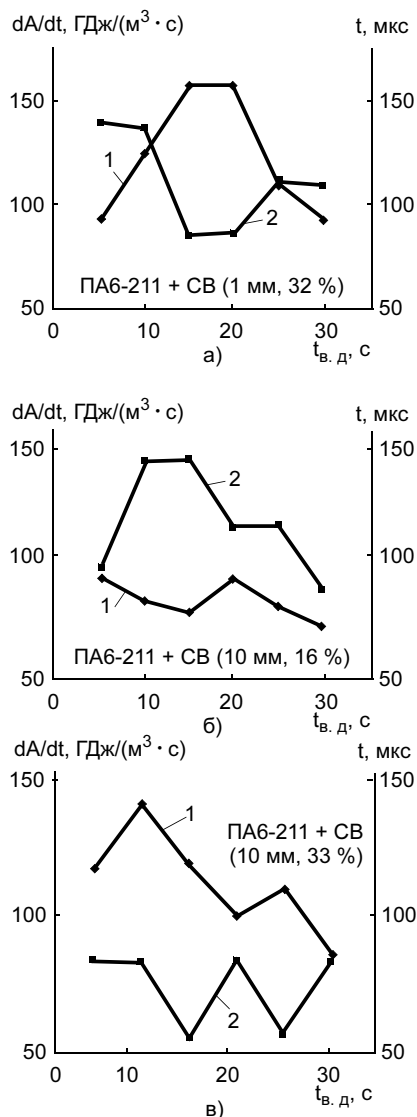


Рис. 4. Зависимость скоростных параметров энергопоглощения композиций на основе стеклонаполненного ПА6-211 от времени выдержки под давлением (1, 2 — см. рис. 3)

По параметру давление впрыска расплава (см. рис. 3): данные показывают, что наибольшие уровни $\frac{dA}{dt}$ достигаются при наполнении короткими стекловолокнами ($l \sim 1$ мм, 32%). При этом экстремум этого параметра отчетливо указывает оптимальное значение технологического параметра около 70 МПа, и время достижения экстремальных уровней $\frac{dA}{dt}$ может варьироваться по зна-

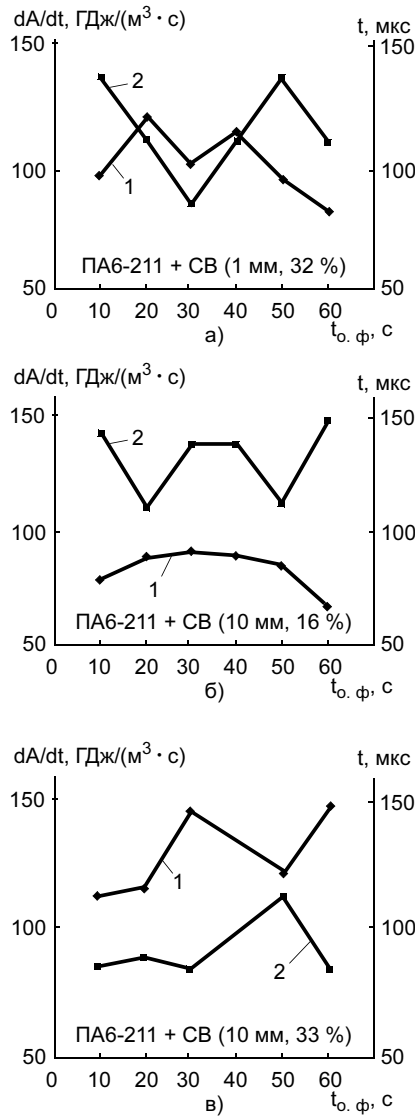


Рис. 5. Зависимость скоростных параметров энергопоглощения композиций на основе стеклонаполненного ПА6-211 от времени охлаждения в форме (1, 2 — см. рис. 3)

чениям t_A в весьма широких пределах. Назначение оптимума по t_A должно диктоваться техническими условиями на изделие. Наполнение длинными стекловолокнами, особенно ($l \sim 10$ мм, 16 %), резко снижает параметр $\frac{dA}{dt}$ и вместе с тем существенно снижает параметр t_A , т. е. ускоряет развитие опасных дилатонных структур в полиамидной матрице.

По параметру время выдержки под давлением (рис. 4): выяв-

ленные закономерности (см. рис. 3) в целом повторяются и для этого параметра литья. Однако в перспективной композиции ($l \sim 1$ мм, 32 %) кривая по $\frac{dA}{dt}$ имеет площадку по оптимальным значениям времени выдержки под давлением $t_{в.д.} \sim 15\text{—}22$ с. Наполнение длинными волокнами и в этом случае приводит к весьма существенному занижению $\frac{dA}{dt}$ и лишь для наполнения ($l \sim 10$ мм, 33 %) практический интерес может представлять диапазон $t_{в.д.}$ от 5 до 15 с. Оптимизация t_A для этого параметра также должна означаться эксплуатационными условиями на изделия.

По параметру время охлаждения в форме (рис. 5): оптимизация расширяет возможности достижения высоких уровней $\frac{dA}{dt}$ для композиций, наполненных длинным стекловолокном ($l \sim 10$ мм, 33 %). Причем увеличение длительности охлаждения расплава в форме $t_{о.ф.}$ целесообразно до уровня 40—50 с. Для остальных композиций (см. рис. 5) этот параметр высоких уровней $\frac{dA}{dt}$ не отображает. Вероятно, это означает большую практическую значимость других технологических параметров.

Таким образом, представленные экспериментальные результаты свидетельствуют о значительных возможностях направленного регулирования как степени активации опасных очагов множественных микроразрушений в полимерных материалах на молекулярном уровне, так и о возможностях технологической оптимизации структуры материала изделия с целью повышения его эксплуатационной работоспособности.

ВЫВОДЫ

1. Анализ среды с "дилатонным" насыщением позволяет скоррек-

тировать традиционно рассматриваемые предельные механические характеристики материалов на уровне более достоверных значений параметров свойств материалов при ударных нагрузках за счет прогнозирования момента актового времени, когда возникает резкая активация множественных очагов дилатонно-кластерных разрушений.

2. Энергосиловой анализ механических свойств рассмотренных композиций с учетом активационных механизмов дилатонного разрушения полиамидов установил весьма значительное снижение доверительного уровня энергоемкости разрушения стеклонанополненных композиций с уровня A_B до уровня A_A . Параметры силовой оценки свойств материалов по напряжениям существенного снижения не проявляют. Заметное снижение параметра σ_d может отмечаться только на отдельных значениях технологиче-

ских параметров литья под давлением.

3. Установлено значительное влияние технологических параметров литья на параметры оценки внутренних активаций разрушительных процессов на молекулярном уровне для всех рассматриваемых композиций ПА6-211. Следовательно, для изделий динамического назначения оптимизацию технологических режимов формования полимерных изделий необходимо производить с учетом оценок активационных временных пределов их достоверной работоспособности в эксплуатационных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухаров С. В., Рыбин А. А. Энергосиловая оценка предельных механических свойств волокнисто-наполненных полиамидов при ударных нагрузках сжатия // *Технология машиностроения*. 2006. № 8. С. 18—23.

2. Рыбин А. А., Бухаров С. В. Влияние волокнистого стеклонанополнителя на активацию очагов множественного дилатонного разрушения полиамида при ударном сжатии. Ч. I // *Научные труды ГОУВПО "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского*. М., 2006. Вып. 10 (82). С. 64—68.
3. Рыбин А. А., Бухаров С. В. Влияние волокнистого стеклонанополнителя на активацию очагов множественного дилатонного разрушения полиамида при ударном сжатии. Ч. II // *Научные труды ГОУВПО "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского*. М., 2006. Вып. 10 (82). С. 68—73.
4. Петров В. А., Башкарев В. И., Веттегрн В. И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. С.-Петербург: Политехника, 1993. 475 с.
5. Рыбин А. А. Материаловедческие основы формирования характеристик работоспособности полимерных материалов при высокоскоростном нагружении. Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2003.
6. Колокольчиков В. В. Отображения функционалов памяти. М.: УРСС, 2001. 223 с.
7. Мотт Н., Снеддон И. Волновая механика и ее применения: Пер. с англ. В. Л. Гуревича. М.: Ком Книга, 2006. 427 с.

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

Основные направления создания высокопрочных и высоконадежных композиционных материалов на основе титановых сплавов

В настоящее время в России разработан ряд конструкционных титановых сплавов, в том числе и сплавов, обладающих высокими прочностью и эксплуатационной надежностью. Данные сплавы успешно применяются в различных изделиях авиакосмической и ракетной техники.

Автором данной работы предложена теория комплексного легирования [1] и сварки [2] титановых сплавов, разработаны более 20 конструкционных титановых сплавов и более 200 режимов их термической и термомеханической обработки. Разработанные конструкционные титановые сплавы и технологические процессы их термической обработки и сварки обеспечивают снижение на 20—30 % массы деталей и узлов космических аппаратов "Луна", "Марс", "Венера", "Астрон", самолетов серии

"Ан", "Бе", "Ил", "МиГ", "Су", "Ту", "Як" и ракет различного назначения¹ [3—5].

Постоянно растущие требования повышения прочности и весовой эффективности при одновременном повышении эксплуатационной надежности конструкций обуславливают необходимость разработки новых научных и практических решений.

Повышение прочности титановых сплавов традиционными методами легирования и термической обработки связано, как правило, со снижением пластичности и опасностью хрупкого разрушения. Вместе с тем имеется возможность одновременно повысить прочность и пластичность титановых спла-

¹ За данную работу коллективу авторов были вручены медали и дипломы лауреатов премии Правительства Российской Федерации (руководитель работ — д-р техн. наук А. И. Хорев).

вов путем создания композиционных материалов (КМ) из них [1—9].

Исследование и разработку КМ проводили по следующим перспективным направлениям: многослойные КМ, КМ с внутренним и внешним армированием.

Одновременно велись систематические исследования в широком диапазоне параметров (легирования, термической, термомеханической обработки и др.) по следующим направлениям:

- создание современных $\alpha + \beta$ - и β -титановых сплавов на основе разработанной теории комплексного легирования [1, 6];
- разработка многостадийных температурно-деформационных процессов обработки сплавов давлением;
- разработка новых процессов термической и термомеханической обработки, обеспечивающих эффективное многофазное упрочнение и получение естественного КМ [2];
- эффективное использование многофакторного механизма упрочнения естественного КМ, включающего твердорастворный, дисперсионный и интерметаллидный (ограниченно) механизмы [7, 8];
- создание прогрессивных технологических процессов изготовления конструкций, позволяющих эффективно использовать КМ.

На диаграмме титан- β -стабилизаторы приведены разработанные титановые сплавы, которые применяли в виде матрицы при создании различного типа композиционных материалов: α -сплавы BT1-0 и BT-1-00; $\alpha + \beta$ -сплавы BT6, BT14, BT16 и BT23 (BT23Л, BT23К); β -сплавы BT19, BT15 и BT15-1 (рис. 1).

Разработаны сплавы различной сложности легирования: BT1-0 — однокомпонентный технический титан, BT6 — трехкомпонентный; BT14, BT16, BT15 — четырехкомпонентные; BT23, BT19 — шестикомпонентные [1].

Многослойные КМ из титановых сплавов

Новый класс КМ представляет сочетание хотя бы двух химически разнородных составляющих с грани-

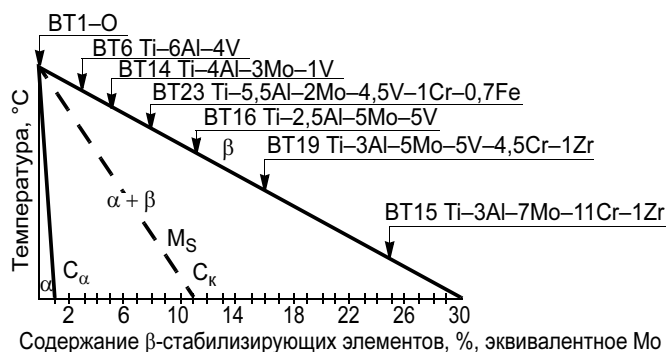


Рис. 1. Титановые сплавы для КМ

цей раздела между ними. КМ, состоящие из слоев титановых сплавов различного химического и фазового состава, соответствуют этим признакам.

Конструкции из титановых сплавов, термически обработанных на высокий уровень прочности, могут разрушаться хрупко при напряжениях, меньших предела текучести. Вероятность разрушения возрастает при работе сплава в условиях двухосного растяжения, особенно при наличии на поверхности рисок, царапин и других дефектов.

От дефектов в металле, в большинстве случаев на поверхности, трещина, беспрепятственно развиваясь, прорастает на всю толщину, приводя к преждевременному разрушению конструкции. Разрушение можно предотвратить, если использовать КМ, состоящие из слоев высокопрочных и низкой или средней прочности титановых сплавов. Для повышения сопротивляемости распространению трещин и снижению склонности к хрупкому разрушению рекомендуют применять композиционные материалы с пластичными поверхностными слоями, а для обеспечения высокой циклической прочности — композиции с высокопрочными поверхностными слоями.

Наличие мягкой прослойки в композиции способствует повышению технологической пластичности материалов при таких операциях, как штамповка, а также позволяет повысить их конструкционную прочность.

Для изготовления многослойных КМ использован метод термомеханического соединения при горячей прокатке пакета, составленного из листов различных материалов.

Поверхность листов перед сборкой в пакеты тщательно очищали, подвергали травлению и протирали бензином, а затем спиртом. Несколько пакетов подвергали диффузионному сращиванию в вакууме, для чего пакет зажимали в специальном приспособлении и отжигали в вакууме при 880 °С в течение 2 ч.

Все пакеты обваривали по периметру аргонодуговой ручной сваркой с присадкой сплава BT1 для предотвращения проникновения воздуха между листами, что может вызвать их окисление и расхождение пакета при прокатке.

Пакеты, предназначенные для изготовления композиционных листов, прокатывали в горячем состоянии до толщины 4—5 мм, а предназначенные для изготовления листов толщиной 10 мм — до толщины 16 мм. При этом для того, чтобы обеспечить сварку слоев КМ, пакеты подвергали наибольшей деформации при первом проходе. Затем проводили прокатку в нагретом и холодном состояниях по специальной технологии.

Уровень механических свойств композиционных листовых материалов существенно зависит от качества подготовки поверхностей, составляющих

Таблица 1

Материал, вид термической обработки		σ_B , МПа	$\frac{\sigma_{BK}}{\sigma_B}$	σ_{BK}^H , МПа	$\frac{\sigma_{BK}^H}{\sigma_B}$	КСТ	KCU
		МДж/м ²					
Сплав ВТ23, монолитный лист (1,8 мм)	Отжиг	1250	1,14	1114	0,88	0,22	0,37
	Закалка + старение	1375	1,1	1017	0,74	0,18	0,23
ВТ23 (0,34 мм × 4 слоя)	Отжиг	1290	1,27	1219	0,94	0,32	0,47
ВТ23 + ОТ4 (0,1 мм × 5 слоев)	Закалка + старение	1570	1,21	1360	0,87	0,27	0,38

композицию. Наличие на их поверхности газонасыщенного слоя, обнаруживаемого при металлографическом анализе, приводит к значительному снижению механических свойств КМ, особенно пластичности. Так как приграничные зоны определяют способность "залечивать" образующиеся на поверхности дефекты, то контакт этой составляющей с еще менее пластичным газонасыщенным α -слоем может усилить влияние дефектов. Этим обусловлена необходимость тщательной подготовки составляющих для композиционных многослойных материалов.

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

В многослойной композиции мягкие низкопрочные слои вытянуты в направлении максимальных растягивающих напряжений, тогда как в естественном композиционном материале отдельные фазовые составляющие могут быть вытянуты в направлении, перпендикулярном максимальным растягивающим напряжениям, что приводит к значительному снижению механических характеристик.

Так как наличие слоя мягкой составляющей оказывает влияние только на поверхностные дефекты, то механические свойства композиции должны повышаться с увеличением числа слоев и уменьшением толщины слоя прочной составляющей. С другой стороны, увеличение числа слоев сопровождается увеличением межфазовых границ и, следовательно, дефектов технологии изготовления композиции. Для каждой композиции существует некоторый оптимум, определяемый количественным соотношением составляющих различной прочности, числом и толщиной их слоев.

Были испытаны трех-, пяти- и семислойные композиции, в которых доля прочности составляющей, определяемая суммарной толщиной слоев, составила 30, 50, 70 и 90 %. Кроме того, испытывали монолитные образцы сплавов, выбранных в качестве прочной и мягкой составляющих. Для исследуемых композиций в качестве прочной составляющей бы-

ли выбраны сплавы ВТ23 и ВТ15, а в качестве мягкой составляющей сплав ОТ4.

На основе исследований разработана многослойная композиция, состоящая из четырех слоев (толщиной 0,34 мм) высокопрочного комплексно-легированного $\alpha + \beta$ -сплава ВТ23 и пяти слоев (толщиной 0,1 мм) псевдо- α -сплава ОТ4 средней прочности (табл. 1). Для сравнения взят монолитный лист толщиной 1,8 мм из сплава ВТ23. Всесторонние исследования проводили в отожженном и термически упрочненном состояниях.

Испытание проводили при осевом (σ_B) и двухосном растяжении гладких (σ_{BK}) и надрезанных (σ_{BK}^H) образцов (надрез длиной 10 мм и глубиной 0,1 мм). Определяли трещиностойкость (КСТ) и ударную вязкость (KCU) образцов.

Разработанная многослойная композиция обладает большей прочностью, большим отношением σ_{BK}/σ_B , меньшей чувствительностью к надрезу ($\sigma_{BK}^H/\sigma_{BK}$) и более высокими характеристиками КСТ и KCU.

Композиционные материалы, включающие мягкие прослойки, имеют при двухосном растяжении большую, чем при осевом растяжении, конструкционную прочность при значительно более пластичном разрушении, что особенно заметно при их термически упрочненном состоянии. Повышение прочности КМ при двухосном растяжении можно объяснить большим текстурным упрочнением титановых сплавов, которое достигается в тонких слоях композиции при прокатке.

КМ на основе титана с внутренним армированием

Эксплуатационные свойства титановых сплавов за последние годы значительно улучшились, повысились их усталостная прочность, пластичность при разрушении и др. Однако существенным не-

достатком остается небольшой удельный модуль упругости, что вынуждает использовать сложные конструкции, которые явились предшественниками новых КМ. Материалы не всегда обладают такой комбинацией свойств, которая требуется для летательных аппаратов, для которых высокое отношение подъемной силы к массе имеет решающее значение. КМ могут снизить массу летательных аппаратов на 30—40 %, благодаря чему можно удвоить их перевозимую нагрузку и сделать эти аппараты экономически более выгодными.

Работы по созданию КМ с внутренним армированием в ВИАМе начались давно и успешно². КМ с внутренним армированием должны найти применение в конструкциях, от которых требуется большая жесткость. Армированные волокнами металлы — особый и сложный класс материалов. В отличие от большей части металлов и сплавов они анизотропны, а степень их анизотропии зависит, прежде всего, от степени ориентации волокон.

Максимальная прочность и жесткость, например, достигаются тогда, когда все волокна ориентированы по направлению приложенной нагрузки. И наоборот, прочность КМ гораздо ниже, если волокна ориентированы перпендикулярно приложенной нагрузке или если они распределены в матрице хаотично. Однако прочность и анизотропию можно контролировать выбором волокон и их ориентированной упаковкой.

В армированных волокнами металлах главное назначение волокон заключается в том, чтобы нести нагрузку, тогда как металлическая матрица передает нагрузку волокнам и распределяет ее между ними. Следовательно, механические свойства КМ зависят от свойств как волокон, так и матрицы. Правильным сочетанием матричного материала и волокон, а также контролем за ориентированной упаковкой последнего можно создать КМ с заданными показателями вязкости, прочности, жесткости, срока службы при высоких температурах.

Проявляющийся в настоящее время интерес к армированным волокнами металлам объясняется в значительной степени их потенциально высокой конструкционной эффективностью, а именно хорошими весовыми характеристиками, т. е. большими удельной прочностью и удельным модулем (отношение соответственно прочности и модуля к плотности). Такие волокнистые КМ представляются наиболее перспективными в космической технике, где в качестве первоочередных требований выдвигаются малая масса и высокие рабочие температуры.

КМ представляют гетерогенные структуры, состоящие из пластичной или упругой матрицы (например титановой) с равномерно распределенными в ней непрерывными или дискретными высокопроч-

Таблица 2

Сплав (фольга)	Толщина, мкм	σ_B , МПа
BT1-00	80	300
BT6C	100	830
BT16	100	800
BT23 (отжиг)	80	1000
BT23 (закалка + старение)	80	1200

Таблица 3

Материал	σ_B , МПа	E , ГПа	d , кг/м ³
SiC	1800	420	3500
B/SiC	2300	400	2700

ными волокнами. Механические свойства таких материалов в значительной мере определяются свойствами упрочняющих волокон, их геометрическими размерами и объемным содержанием в композиции.

Успехи, достигнутые в области освоения промышленного производства непрерывных поликристаллических и многофазных волокон бора, углерода, карбида кремния, бериллия и нитевидных кристаллов карбида кремния, сапфира и др., выдвинули вопрос о создании для современного материаловедения легких КМ, по прочности и жесткости превышающих лучшие титановые, алюминиевые сплавы и стали.

Были разработаны КМ на основе титана с внутренним армированием. В качестве матрицы применяли фольгу толщиной 80—100 мкм из сплавов с пределом прочности от 300 до 1200 МПа (табл. 2). Максимальный уровень прочности достигнут на фольге из сплава BT23, что на 300—400 МПа выше, чем используемая фольга за рубежом.

В качестве армирующих волокон применяли SiC и B/SiC диаметром 90—100 мкм, механические свойства (σ_B , E) и плотность (d) которых приведены в табл. 3.

В качестве метода получения КМ на основе титана, армированного волокнами, принята технология диффузионной сварки под давлением в вакууме пакета, состоящего из чередующихся слоев титана и волокон. Диффузионную сварку композиций проводили в молибденовой пресс-форме, которую помещали в вакуумную камеру.

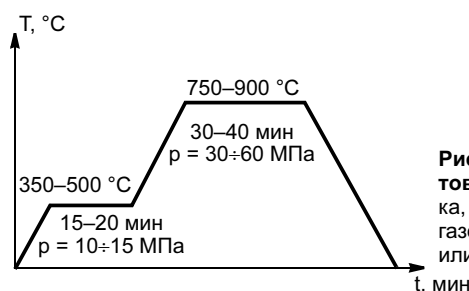


Рис. 2. Режим изготовления КМ: сборка, вакуумирование, газостатирование или прессование

²А. с. 526672, 533654.

Таблица 4

Титановый сплав (матрица)	Температура прессования, °C
BT6	900
BT23	870
BT19	750

Таблица 5

Составляющие композиции		σ_B , МПа, при T , °C		E , ГПа	d , кг/м ³
Сплав	Волокна (20 %)	20	500		
BT23	SiC	980	720	185	4100
BT16	SiC	950	580	185	4100
BT6C	SiC	820	520	185	4000
BT1-0	SiC	500	320	185	4000
BT23	B + SiC	990	610	195	3600
BT16	B + SiC	900	530	195	3600

Остаточное давление в камере составляло 666,5 Па. Нагрев осуществляли расфокусированным электронным лучом.

Режим изготовления КМ приведен на рис. 2. На первой стадии нагрев проводили до температуры 350—500 °C, выдерживали при небольшом давлении, затем нагревали до 750—900 °C и выдерживали при высоком давлении ($p = 30 \div 60$ МПа). Температура прессования должна быть на 20—40 °C ниже температуры полиморфного превращения и снижается от сплава BT6 к сплавам BT23 и BT19. Стойкость против нагрева различных волокон не одинакова и возрастает в следующей последовательности: B $\rightarrow$ B + SiC $\rightarrow$ B₄C/B $\rightarrow$ ScS-6.

В табл. 4 приведена температура прессования для КМ с матрицей из различных титановых сплавов.

Температура прессования понижается с понижением температуры полиморфного превращения сплавов от сплава BT6 ($T_{пл} = 960$ °C) к BT23 (920 °C) и к BT19 (780 °C).

Механические свойства КМ с внутренним армированием приведены в табл. 5.

Максимальным уровнем прочности при 500 °C, равным 720 МПа ($\sigma_B^{500}/d = 17,5$ км), характеризуется разработанная композиция, состоящая из фольги сплава BT23 и волокон SiC. Более низкую прочность при 500 °C, равную 610 МПа ($\sigma_B^{500}/d = 16,9$ км), имеет композиция, состоящая из фольги сплава BT23 и волокон B + SiC. Значительно (на 60 %) повысился модуль упругости КМ по сравнению с титановыми сплавами.

КМ на основе титана с внешним армированием

Метод подкрепления или усиления узлов существующих конструкций — панелей, кронштейнов,

балок и др., изготовленных из титановых сплавов, прослойками или накладками из таких КМ, как полимерные материалы КМУ-1, КМБ-1, имеет большую перспективу применения.

КМ на полимерной основе — углепластик и боропластик — имеют плотность 1400 и 1950 кг/м³, прочность на изгиб 750 и 1200 МПа и модуль упругости 170 и 220 ГПа соответственно.

При усилении конструкций подкрепляющими элементами согласовываются поля сопротивления с полями напряжений. При усилении лонжерона крыла из титанового сплава накладками боралюминиевого КМ масса узла снижается на 42 %, а жесткость его возрастает на 45 %.

Наиболее целесообразным способом повышения весовой отдачи и увеличения надежности таких конструкций, как автоклавы, цистерны, баллоны высокого давления, а также детали, имеющие форму тел вращения, является их усиление внешним армированием однонаправленной лентой из волокон бора или углерода, стеклопластиков. Подобное внешнее армирование корпусов, баллонов и других деталей приводит к увеличению конструкционной прочности в 1,5—2,0 раза по сравнению с цельнометаллическими корпусами. Принцип создания КМ внешнего армирования заключается в том, что материал однонаправленной структуры располагают на поверхности упрочняемого элемента по направлению действия в нем наибольшего главного напряжения, что особо выгодно в случае, когда это напряжение значительно превышает другие: при одноосном напряженном состоянии, например, в растянутых полках лонжеронов, при плоском напряженном состоянии с соотношением главных напряжений (тангенциального и осевого) не менее 2, например в цилиндрических емкостях, нагруженных внутренним давлением. Эффективность КМ внешнего армирования достигается тем, что в нем удается практически полностью реализовать прочность резко анизотропного, очень высокопрочного в одном направлении армирующего элемента, повысив при этом надежность композиции в целом, и избежать многих трудностей, возникающих при изготовлении изделий из КМ с внутренним армированием.

Известны трудности, возникающие при создании высокопрочных металлических емкостей, работающих под внутренним давлением. Практически удельная прочность титановых сплавов, используемых в емкостях, не превышает 30 км, при этом надежность понижена в связи с опасностью преждевременного хрупкого разрушения при наличии концентраторов напряжения и повреждения поверхности. Еще меньшей удельной прочностью обладают емкости, изготовленные из алюминиевых сплавов и сталей. КМ внешнего армирования в этом случае позволяют существенно (на 40—50 %) повысить удельную прочность.

Одной из наиболее эффективных областей применения КМ с внешним армированием являются сосуды и емкости, работающие под высоким внутренним давлением: гидроаккумуляторы, газовые баллоны и др.

Разработка технологий изготовления сварных (из $\alpha + \beta$ -сплава ВТ23) и монолитных (β -сплава ВТ19) цилиндрических емкостей

Цилиндрические емкости обычно изготавливают сверткой из листа с последующей сваркой продольного шва (рис. 3).

Продольный сварной шов такой емкости находится в зоне действия максимальных тангенциальных напряжений, которые в 2 раза больше, чем напряжения в осевом направлении. Таким образом, прочность сплава в осевом направлении не реализуется полностью. Сварные емкости термообработывали на различный уровень прочности при основном растяжении (σ_B), чем достигался различный уровень конструкционной прочности (σ_{BK}) при двухосном растяжении. Предложены различные методы изготовления цилиндрических емкостей из комплексно-легированного $\alpha + \beta$ -сплава ВТ23: сварка спиральной емкости, свернутой из ленты; сварка продольным швом с последующей деформацией на стане поперечной прокатки; емкости с утолщением в зоне шва, достигнутым утонением основного металла механической обработкой или химиче-

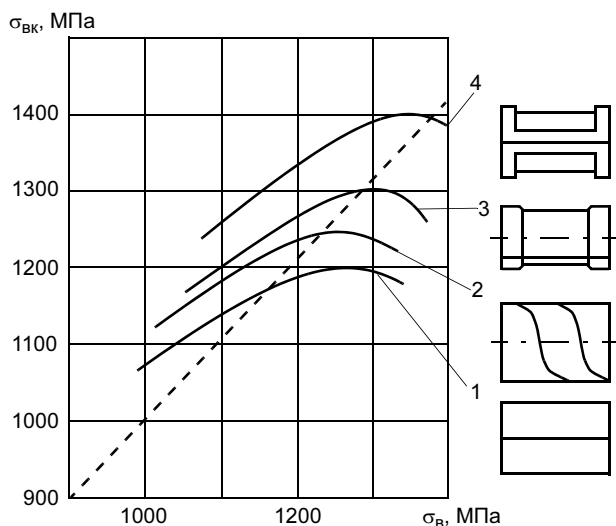


Рис. 3. Зависимость конструкционной прочности сварных емкостей из комплексно-легированного $\alpha + \beta$ -сплава ВТ23 от технологии изготовления ($\sigma_{BK1} : \sigma_{BK2} : \sigma_{BK3} : \sigma_{BK4} = 1 : 1,1 : 1,15 : 1,3$): 1 — продольный сварной шов (σ_{BK1}); 2 — спиральный сварной шов (σ_{BK2}); 3 — продольный сварной шов + деформация на 60 % при 600 °С (σ_{BK3}); 4 — сварной шов в утолщенной зоне (σ_{BK4})

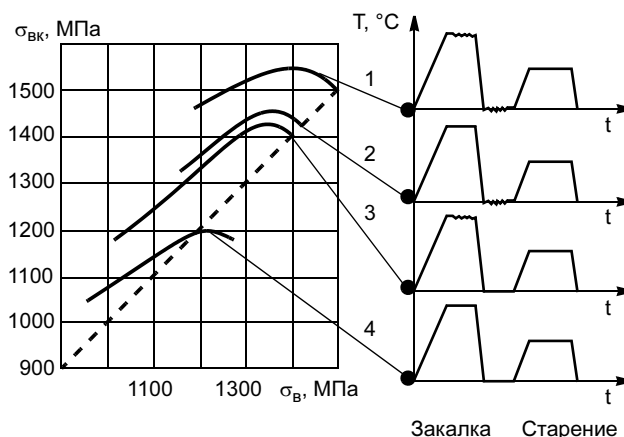


Рис. 4. Зависимость конструкционной прочности баллонов из комплексно-легированного β -сплава ВТ19 от вида обработки: 1—4 — ВНМО; НМО; ВМО; упрочняющая термическая обработка

ским фрезерованием. Максимальная конструкционная прочность, равная 1400 МПа, получена на емкости (диаметром 200 мм) из сплава ВТ23 с утолщением в зоне сварного соединения. Конструкционная прочность таких сварных емкостей равна конструкционной прочности монолитных труб.

Оплетка этих емкостей высокопрочными нитями в такой мере, чтобы усилить тангенциальное направление и достигнуть полной реализации прочности в осевом направлении и является задачей создания КМ и конструкции.

Эта задача возникла в связи с созданием надежных в работе и легких баллонов для газового топлива, предназначенных для автотранспорта. Переход на газовое топливо позволит решить важнейшую экологическую задачу.

Дальнейшего повышения конструкционной прочности емкостей можно достигнуть, применяя термомеханическую обработку монолитных труб из комплексно-легированного β -сплава ВТ19 (рис. 4). Следует отметить, что емкости являются наиболее эффективной областью применения β -сплава ВТ19, где учитывается его хорошая деформируемость при холодной деформации на стане поперечной прокатки.

Если после упрочняющей термической обработки (заковки в воде и старения) достигнута максимальная конструкционная прочность, равная 1200 МПа, то, применяя высокотемпературную термомеханическую обработку (ВМО) (горячую деформацию с охлаждением в воде + старение), можно достигнуть конструкционную прочность 1400 МПа.

Обработывая емкости по схеме заковка, холодная деформация, старение (низкотемпературная термомеханическая обработка — НМО), можно будет получить еще более высокую конструкционную прочность. Максимальный эффект достигнут

при комбинированной термомеханической обработке ВТМО + НТМО (ВНТМО) β -сплава.

По такой схеме изготавливали из β -сплава ВТ19 с последующей оплеткой высокопрочными нитями цилиндрические изделия типа емкостей одного из КБ.

Таким образом, в области создания высокопрочных оболочек, предназначенных для КМ с внешним армированием, достигнут большой прогресс и получены рекордно высокие показатели конструкционной прочности на комплексно-легированных $\alpha + \beta$ -(ВТ23) и β -(ВТ19) титановых сплавах.

Изготовление КМ с внешним армированием

Для исследований и создания КМ с внешним армированием были взяты монолитные емкости, изготовленные из труб сплава ВТ23. Емкости подвергали отжигу ($\sigma_{BK} = 1100$ МПа) и закалке + старению ($\sigma_{BK} = 1400$ МПа). Для оплетки применяли различные нити со связующим пластиком (табл. 6).

Стеклопластики ВМ1, ВМП и пластик ВНИВЛОН обладают высокой удельной прочностью, равной 95—113 км (в 3—4 раза большей, чем у титановых сплавов), низкой плотностью при высокой прочности.

Углепластик и боропластик по сравнению с титановыми сплавами обладают в 2 раза более высоким модулем упругости, в 2,5—4,5 раза меньшей плотностью и в 2 раза большей удельной прочностью.

Емкости из комплексно-легированного титанового сплава ВТ23 в термически упрочненном состоянии, оплетенные различными пластиками с высокопрочными и высокомодульными волокнами, имели высокую конструкционную прочность, достигающую $\sigma_{BK.ЭКВ}$ (эквивалентную титану) и равным

2250 МПа при удельной прочности, достигающей 50 км (табл. 7).

Лучшим разработанным КМ с внешним армированием является термоупрочненная на уровень конструкционной прочности ($\sigma_{BK} = 1400$ МПа) емкость из сплава ВТ23, оплетенная пластиком ВНИВЛОН ($\sigma_{BK.ЭКВ.ТИТ} = 2160 \div 2250$ МПа, $\sigma_{BK}/d = 48 \div 50$ км).

По проблеме конструкционных материалов автором разработаны 24 промышленных титановых и шесть опытно-промышленных сплавов, семь КМ на основе титана, 227 технологических процессов, опубликованы четыре монографии, более 200 статей, 326 патентов и авторских свидетельств на изобретение, более 200 из которых применены, 74 вошли в состав лицензий, проданных за рубеж.

ВЫВОДЫ

1. Многослойная композиция, состоящая из четырех слоев сплава ВТ23 и пяти слоев сплава ОТ4, обладает большей конструкционной прочностью, меньшей чувствительностью к надрезу и большими характеристиками трещиностойкости и вязкости разрушения, а следовательно, и большей надежностью, чем монолитный сплав ВТ23.

2. Композиционный материал с внутренним армированием, состоящий из слоев фольги сплава ВТ23 и слоев волокон SiC, отличается высокой удельной жаропрочностью при 500 °С, равной 17,5 км.

3. Композиционный материал с внешним армированием, состоящий из термически упрочненной емкости из сплава ВТ23, оплетенной пластиком ВНИВЛОН, имеет рекордно высокую конструкционную прочность 2160—2250 МПа и удельную прочность 48—50 км.

Таблица 6

Материал	d , кг/м ³	E , ГПа	σ_{BK} , МПа	δ , %	σ_{BK}/d , км
Стеклопластик ВМ1	1900	60	1800	3	95
Стеклопластик ВМП	1900	62	2000	3,5	105
Пластик ВНИВЛОН	1150	70	1300	3	113
Углепластик	1125	220	800	0,7	64
Боропластик	2000	230	1200	0,55	60

Таблица 7

Режим термической обработки	Тип пластика	σ_{BK} оболочки, МПа	$\sigma_{BK.ЭКВ}$, МПа	σ_{BK}/d , км
Отжиг	ВМ1 ВМП	1100 1100	1800—1900 1800—1850	41—42 40—41
Закалка + старение	ВМ1	1400	1950—2000	43—44
	ВМП	1400	2150—2200	48—49
	ВНИВЛОН	1400	2160—2250	48—50
	Углепластик	1400	1570—1800	35—40
	Боропластик	1400	1450—1800	32—36

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Хорев А. И. Комплексное легирование и термомеханическая обработка титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1979. 228 с.
- Хорев М. А. Структурно-фазовые состояния и надежность сварных соединений титановых сплавов. М.: НПО ВИАМ, 1991. 107 с.
- Хорев М. А. Упрочнение сварных соединений титановых сплавов, полученных электронно-лучевой сваркой // Митом. 1985. № 1. С. 52—54.
- Хорев М. А. Дендритная ликвация в металле шва сварных соединений титановых сплавов // Сварочное производство. 1989. № 5. С. 37—39.
- Металловедение титана и его сплавов / С. П. Белов, А. И. Хорев и др. М.: Металлургия, 1992. 352 с.
- Хорев А. И., Хорев М. А. Титановые сплавы и технологические процессы для космической техники и народного хозяйства // Титан. 1993. № 4. С. 70—75.
- Хорев А. И., Хорев М. А. Современные титановые сплавы в авиакосмической технике // Авиакосмическая техника и технология. 1997. № 1. С. 15—22.
- Хорев М. А., Хорев А. И. Титановые сплавы, их применение и перспективы развития // Материаловедение. 2006. № 7. С. 25—34.

С. Н. ЖЕРЕБЦОВ, инж., А. Л. ИВАНОВ, инж., А. А. ПЛЕМЕНЮК, инж.
ООО «ПКФ "МираМет"», Омск

Электрошлаковое литье деталей из конструкционных сталей для энергоблоков

Развитие теплоэнергетики выдвигает повышенные требования к качеству металла, используемого для изготовления основных деталей тепло- и энергоблоков. Общая тенденция, выражающаяся в возрастании единичной мощности тепло- и энергоагрегата, ставит перед производителями, в первую очередь металлургами, важную задачу — при значительном увеличении размеров и массы единичной детали (например, диска ротора паровой турбины, вала ротора генератора или турбины) необходимо улучшить качество металла изделия, повысив тем самым надежность и экономичность работы энергоагрегата.

Исследование конструкционной прочности данных изделий показало, что высокий уровень их надежности обеспечивается только в случае применения металла с низким содержанием вредных примесей (S, P), содержащего незначительное количество равномерно распределенных неметаллических включений и обладающего необходимыми физико-механическими свойствами, в том числе достаточным температурным запасом вязкости. Последнее требование, выражаемое критерием критической температуры хрупкости, является особенно важным для изделий, работающих в условиях переменных динамических нагрузок.

Обеспечить выполнение этих требований возможно только при использовании современных металлургических процессов, в частности, электрошлакового переплава (ЭШП).

Для изготовления роторов, дисков турбин, фланцев, кольцевых заготовок применяется конструкционная среднелегированная сталь 38ХНЗМА (ГОСТ 5950—73), химический состав которой приведен в табл. 1. В настоящее время освоена технология получения изделий массой 1000 кг и более. В статье приведены результаты исследования этого металла после ЭШП.

После ЭШП металл однороден по химическому составу, изменение содержания элементов в нем обусловлено химическим составом флюсов, под которыми происходит переплав. Например, при переплаве под флюсом системы $\text{CaF}_2\text{—CaO}$; $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$; $\text{CaF}_2\text{—CaO—Al}_2\text{O}_3\text{—MgO}$ удаляется до 50—60 % серы от ее исходного содержания в металле переплавляемого электрода. Серный отпечаток с темплета изделия, изготовленного из металла после электрошлакового переплава, характеризуется более равномерным распределением серы по сечению образца, на нем выявлены только ликвационные пятна, расположенные вдоль оси отливки.

Кроме того, при использовании данных флюсов значительно удаляются неметаллические включения (в 1,4—1,7 и более раз), при этом по сечению отливки они распределены равномерно. Загрязненность металла в штатных изделиях оценивается 2—3 баллом (ГОСТ 1778—70), а в металле после ЭШП — баллом 1. Также в металле после ЭШП отсутствуют крупные включения в отличие от металла, выплавленного в открытой печи.

При ультразвуковом контроле прямым теческательным на частоте 2,5 МГц и призматическим теческательным на частоте 1,8 МГц изделий, изготовленных из электрошлакового металла, дефекты не обнаружены.

Благодаря высокой степени чистоты металла ЭШП существенно возрастают его пластические свойства при сохранении прочностных свойств на уровне ковального металла. В табл. 2 приведены механические свойства стали 38ХНЗМА.

Эксплуатационная надежность изделий последних ступеней паровых турбин, работающих при температурах, близких к 18—20 °С, определяется отсутствием склонности стали к хладноломкости. Это свойство стали обеспечивается в том случае,

Таблица 1

Сталь	Содержание элементов, %							
	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	P
38ХНЗМА	0,33—0,4	0,25—0,5	0,17—0,37	0,8—1,2	2,75—3,25	0,2—0,3	≤0,025	≤0,025
38ХНЗМА (после ЭШП)	0,35	0,42	0,32	1,10	3,10	0,28	0,022	0,020

Таблица 2

Место взятия пробы	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	a_n , Дж/см ²	НВ
Наружная поверхность отливки (после ЭШП)	920	748	21,0	51,0	14,3	278
Средняя часть отливки (после ЭШП)	903	720	19,0	54,0	15,2	269
Внутренняя часть отливки (после ЭШП)	910	730	20,5	53,6	14,8	272
Прокат (ГОСТ 4543—71)	>1100	>1000	>12	>50	>10	>269
Мартеновская плавка	834	613	19,2	47,2	11,2	27,4

когда температурный запас вязкости (разность между рабочей температурой и критической температурой хрупкости, характеризующей склонность стали к хладноломкости) превышает 30—40 °С. В связи с этим обеспечение снижения критической температуры хрупкости (увеличение температурного запаса вязкости) приобретает особое значение при производстве стали для изделий последних ступеней паровых турбин.

Установлено, что технология производства металла в значительной степени определяет его способность сопротивляться хрупкому разрушению. Исследование склонности стали, выплавленной в различных агрегатах, к хладноломкости показало, что наиболее устойчивой против хрупкого разрушения является сталь, подвергнутая рафинированию при электрошлаковом переплаве. Критическая температура хрупкости этого металла сдвинута в область отрицательных температур, а температурный запас вязкости составляет 70 °С [2]. Такими технологическими возможностями не обладает ни один из современных методов производства стали. Эксплуатационная надежность работы изделий, полученных из стали после ЭШП, существенно увеличивается.

Необходимые свойства металла после ЭШП могут быть получены только при правильном выборе шлакового и электрического режимов переплава. При разработке электрических режимов переплава конструкционных среднелегированных сталей для деталей тепло- и энергоагрегатов используются методы математического моделирования на ЭВМ. Критериями для выбора режимов служат скорость наплавки слитка, глубина жидкой металлической ванны, чистота поверхности слитка и др., которые в зависимости от заданных условий определяли дифференцированный режим ведения переплава. Высокое качество слитка, гарантируемое соблюдением научно-обоснованного технологического режима ЭШП, позволяет выбрать его рациональный развес и тем самым значительно повысить коэффициент использования металла, в результате чего стоимость конечного изделия приближается к

стоимости той же детали, изготовленной традиционными методами литья с последующей механической обработкой.

Особое внимание при разработке технологии ЭШП уделяли проблеме предотвращения насыщения металла водородом в процессе переплава, так как большинство переплавляемых сталей относится к классу флокеночувствительных. Технологию противфлокеной защиты разрабатывали в двух направлениях: подбор композиций флюсов, обеспечивающих минимальную водородпроницаемость при температуре переплава и сохранение рафинирующих свойств шлака, и создание защитных условий, не препятствующих десульфурации. Одним из способов защиты является применение инертных газов, которыми заполняется плавильное пространство кристаллизатора плавильной емкости в процессе переплава расходного электрода.

Использование флюсов с высокой рафинирующей способностью и специальных мер для предотвращения насыщения металла водородом обеспечили освоение ЭШП конструкционных среднелегированных сталей для энергомашиностроения в слитки и получение из них изделий высокого качества.

Таким образом, использование технологии ЭШП позволяет обеспечить выполнение комплекса требований, предъявляемых к качеству крупных заготовок для ответственных деталей энергомашиностроения, и существенно увеличить эксплуатационную надежность этих изделий [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жеребцов С. Н. Исследование технологии электрошлакового переплава для получения изделий ответственного назначения // Прикладные задачи механики. Омск: Изд-во ОмГТУ, 2003. С. 44—47.
2. Жеребцов С. Н., Шабалин В. Н. Эффект упрочнения электрошлакового металла // Ползуновский альманах. Барнаул: Изд-во АлГТУ им. И. И. Ползунова, 2003. № 3. С. 141—142.
3. Электрошлаковый металл / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. Киев: Наукова думка, 1981. 680 с.

Н. Б. АБРАМОВА, канд. техн. наук
Орский гуманитарно-технологический институт

Исследование физико-механических свойств бескислородной меди

Сохранение высоких прочностных характеристик материала рабочих стенок кристаллизаторов машин непрерывного литья заготовок из меди М-ЭЛП при высоких температурах является одним из главных требований, по которому определяется конкурентоспособность материала, так как размерная стабильность непрерывно-литой заготовки зависит от предела прочности на растяжение и показателей пластичности (ψ , δ). Для определения этих характеристик на машиностроительном концерне "ОРМЕТО-ЮУМЗ" проведена серия испытаний на образцах, изготовленных из литой и ковальной меди с различной степенью пластической деформации, а также на образцах, вырезанных в продольном и поперечном направлениях, из кованых труб. При определении физико-механических свойств бескислородной меди применяли стандартные методы и приемы, используемые для механических испытаний по ГОСТ 9651—84 и 1497—84.

Из темплетов и заготовок изготовили образцы стандартных размеров, которые подвергали механическим испытаниям при повышенных и нормальных температурах. Для испытания при повышенных температурах (473—773 К) образцы изготавливали из холоднодеформированных заготовок (маркировка 8, 9, 10, 12), а при нормальной температуре (293 К) — из темплетов (маркировка 8, 9, 12).

Образец для испытания при повышенных температурах приведен на рис. 1.

Испытания проводили на испытательной машине, снабженной муфельной печью для нагрева образцов и системой регулирования температуры, при температуре 293, 473, 523, 623, 673, 723 и 773 К. Время нагрева до заданной температуры и выдержки при ней выбирали из условия равномерности распределения температуры по длине образца и минимальной длительности испытаний. Общая продолжительность нагрева не превышала

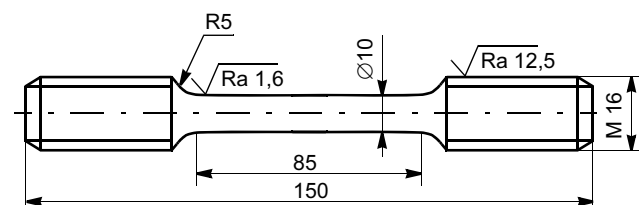


Рис. 1. Образец для испытаний

60 мин, а время выдержки при заданной температуре составило 20 мин. Температуру образца регистрировали хромель-алюмелевой термопарой (диаметр проволоки 0,2 мм), закрепленной в центре рабочей части образца, и регулируемым потенциометром КСПЗ-П (предел измерения от –50 до 1000 °С). Температуру регулировали с точностью до ± 3 °С.

Образец крепили в захватах испытательной машины при помощи удлинительных тяг, что обеспечивало его надежную центровку. Скорость перемещения передвигного захвата в процессе испытаний оставалась постоянной и составляла $5 \cdot 10^{-5}$ м/с. На диаграммном записывающем устройстве воспроизводился процесс испытания в виде кривой, расположенной в координатной системе нагрузка—деформация. Масштабы диаграммной записи — по оси удлинений (деформаций) 1 мм—0,1 Нм.

Испытания стандартных образцов из литой и ковальной меди при $T = 293$ К проводили по ГОСТ 1497—84 на машине ЦД-10. Эскиз образца приведен на рис. 2.

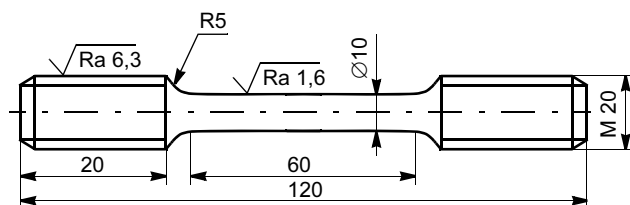


Рис. 2. Образец из литой и ковальной меди

Эскиз образца, вырезанного из кованых труб в продольном и поперечном направлениях, приведен на рис. 3.

Экспериментально полученные значения необходимо использовать для определения взаимосвя-

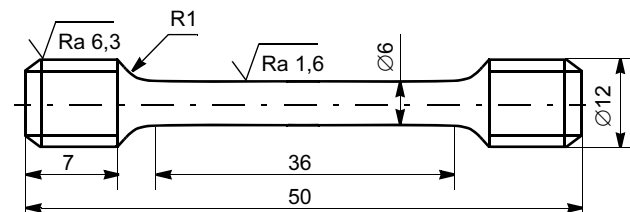


Рис. 3. Образец, вырезанный из кованых труб в продольном и поперечном направлениях

Марки- ровка заго- товки	Содер- жание Cu, %	Параметры технологии			Результаты исследования								
		Интен- сивность дефор- мации ε, %	Темпе- ратура испыта- ний, К	Маркировка образцов (изготовлен- ных из заго- товки)	Темпе- ратура испы- таний, К	Твердость, НВ	Предел прочности на растя- жение σ _в , МПа	Пре- дел те- кучести σ _т МПа	Относи- тельное удлине- ние δ, %	Отно- ситель- ное су- жение ψ, %			
12	99,98	0	293	12-темплет	293	47,5							
		0		12-1	293		165	70	33,0	75,0			
				12-2	293		165	70	49,0	82,5			
				12-3	293		135	45	53,5	66,5			
				12-4	293		145	75	51,0	80,0			
				12-5	293		180	60	47,5	76,0			
				12-6	293		165	55	40,0	56,5			
		82,3	293	12-7	293	107; 107; 107; 107; 107; 107; 107; 114; 114; 114	380	255	15,5	70,0			
				12-8	473	Не измеряли	310	285	9,5	69,5			
				12-9	473		315	305	7,5	57,5			
				12-10	523		290	280	16,5	64,0			
				12-11	523		285	275	12,0	75,0			
				12-12	573		275	270	9,0	27,5			
				12-13	573		295	285	10,0	64,0			
				12-15	653		280	280	8,5	51,0			
				12-16	673		270	255	2,6	26,0			
				1-5-5-1	MC 99,99		0	1-5-5-1	293	90	325	315	17
				1-5-5-2	MC 99,99	0	1-5-5-2	623	Не измеряли	235	225	9	49,5

зи между физико-механическими свойствами, температурой, степенью пластической деформации и твердостью; степени пластической деформации ε , при которой будет наилучшее сочетание пределов прочности σ_B и текучести σ_T , относительного удлинения δ , относительного сужения ψ , а также при последующей обработке пластическим деформированием.

Результаты исследования бескислородной меди М-ЭЛП (99,98 % Cu), полученной в печи электронно-лучевого переплава ЭЛП-30 при 293—773 К, приведены в таблице. Видно, что образцы из бескислородной меди не только не уступают по свойствам серебросодержащей меди, но и превосходят их.

На рис. 4 приведены зависимости предела текучести и пластических свойств

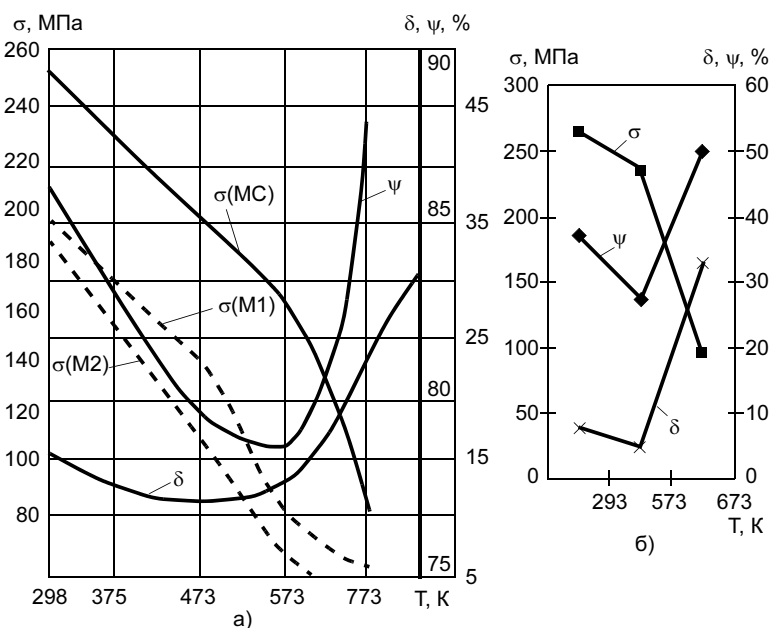


Рис. 4. Зависимость предела текучести и пластических свойств материалов от температуры испытаний: а — медь М1, М2 и МС; б — медь М-ЭЛП

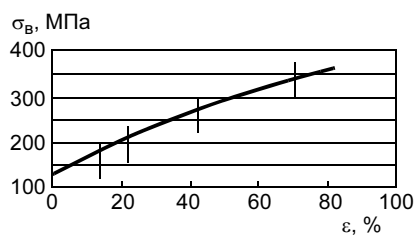


Рис. 5. Зависимость предела прочности от степени пластической деформации

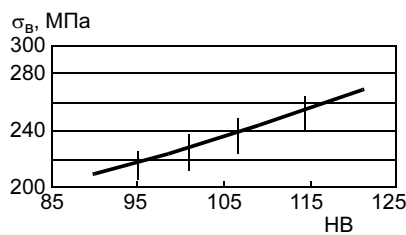


Рис. 6. Зависимость предела прочности на растяжение от твердости

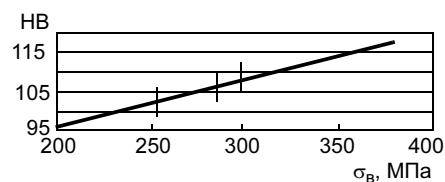


Рис. 7. Зависимость твердости от предела прочности на растяжение

свойств меди М1, М2, серебросодержащей МС и М-ЭЛП от температуры¹.

На рис. 4, б видно, что бескислородная медь М-ЭЛП в зоне рабочих температур ($T = 293\div 673$ К) имеет высокий показатель пластичности по сравнению с медью М1 и М2, а характер связи аналогичен серебросодержащей меди.

Экспериментально установили влияние степени пластической деформации на предел прочности (рис. 5).

В результате статистической обработки получили уравнения регрессии между пределом прочности на растяжение и пластической деформацией для меди М-ЭЛП:

$$\sigma_B = 0,34\varepsilon + 13,575;$$

$$\sigma_{B\min} = \sigma_B - 1,694 \sqrt{0,44 + 0,003(\varepsilon - 19,54)^2};$$

$$\sigma_{B\max} = \sigma_B + 1,694 \sqrt{0,44 + 0,003(\varepsilon - 19,54)^2}.$$

Коэффициент детерминации $d = 0,75$.

Уравнение толерантных пределов

$$\sigma_B = \sigma_B \pm 0,5254 \cdot 2,5.$$

Аналогично находили зависимость между пределом прочности на растяжение и твердостью. Результаты исследования приведены на рис. 6.

По результатам статистической обработки найдено уравнение регрессии между пределом прочности на растяжение и твердостью:

$$\sigma_B = 0,33HB - 7,65.$$

Доверительные границы:

$$\sigma_{B\min} = \sigma_B - 2,19 \sqrt{0,5 + 0,0027(HB - 100,35)^2};$$

$$\sigma_{B\max} = \sigma_B + 2,19 \sqrt{0,5 + 0,0027(HB - 100,35)^2}.$$

Коэффициент корреляции $r = 0,66$.

Уравнение толерантных пределов

$$\sigma_B = \sigma_B \pm 8,5.$$

Установили зависимость твердости от предела прочности, при этом степень пластической деформации по толщине образцов $\varepsilon = 10\div 85$ %. Результаты исследования приведены на рис. 7.

На основании регрессионного анализа определили значения членов эмпирического уравнения регрессии между твердостью и пределом прочности на растяжение:

$$HB = 65,34 + 1,37\sigma_B.$$

Доверительные границы:

$$HB_{\min} = HB - 2,019 \sqrt{1,036 + 0,046(\sigma_B - 25,52)^2};$$

$$HB_{\max} = HB + 2,019 \sqrt{1,036 + 0,046(\sigma_B - 25,52)^2}.$$

Коэффициент детерминации $d = 0,9$.

Уравнение толерантных пределов

$$HB_{\min} = HB \pm 2,3744 \cdot 7,27.$$

Исследования показали, что твердость холоднодеформированных образцов из меди М-ЭЛП, полученных методом кузнечной вытяжки, при $HB \geq 90$ линейно зависит от предела прочности.

ВЫВОД

Высокие физико-механические свойства бескислородной меди, полученной в печи электронно-лучевого переплава ЭЛП-30, можно достичь деформационным упрочнением ковкой. Полученные уравнения регрессии позволяют сформулировать требования к материалу и проектируемым технологиям изготовления рабочих стенок кристаллизаторов МНЛЗ.

¹ Осинцев О. Е., Федоров В. Н. Медь и медные сплавы. Отечественные и зарубежные марки: Справочник. М.: Машиностроение, 2004. 336 с.

Е. С. КИСЕЛЕВ, д-р техн. наук, З. В. СТЕПЧЕВА, аспирант
Ульяновский государственный технический университет

Эффективность применения газообразных СОТС в процессе ультразвукового алмазного выглаживания

Увеличение скоростей перемещения рабочих органов машин и механизмов в современном машиностроении обуславливает повышение требований к обеспечению заданных эксплуатационных характеристик деталей уже в процессе их механической обработки, в особенности, на заключительных операциях. В этой связи все более широкие перспективы применения приобретает обработка ультразвуковым (УЗ) алмазным выглаживанием (АВ), обеспечивающая благоприятное с позиции эксплуатационных свойств детали сочетание геометрических и физико-механических показателей качества поверхностного слоя.

Однако широкому внедрению алмазного выглаживания в промышленность препятствуют сравнительно невысокая его производительность из-за низкой теплостойкости алмазного инструмента [1] и, как следствие, увеличение себестоимости деталей. Как правило, поверхностный слой формируется в условиях повышенного контактного давления в очаге деформации. С одной стороны, это способствует усилению смазочного действия смазочно-охлаждающих технологических средств (СОТС) и облегчению процесса деформирования поверхности благодаря интенсивному образованию в ней капилляров. С другой — повышенное удельное контактное давление может стать причиной разрушения защитных пленок [2], образующихся в результате взаимодействия с молекулами СОТС на контактных поверхностях заготовки и инструмента и препятствующих адгезионному взаимодействию между ними. Кроме того, активная защитная роль пленок в большой степени определяется контактной температурой. При невысоких значениях температуры толщина пленки определяется по логарифмическому закону [4], при высоких — рост пленки осуществляется по линейному закону из-за высокой диффузионной способности главного ее компонента — кислорода. Следствием перечисленных факторов, сопровождающих процесс алмазного выглаживания, являются увеличение адгезионной составляющей коэффициента трения и интенсификация изнашивания рабочей части алмаза, что, в конечном счете, снижает производительность обработки и ее качество.

Как установлено в процессе исследования, эффективным резервом повышения смазочных и дис-

пергирующих свойств СОТС при алмазном выглаживании являются экологически чистые электронно-ионные технологии подачи СОТС. Суть методов заключается в использовании энергии ионизированного и озонированного воздуха [2] как в качестве самостоятельного СОТС, так и в комбинации с традиционными смазочно-охлаждающими жидкостями (масло "Индустриальное 20", веретенное масло, олеиновая кислота, сульфозфрезол и др. [1, 3]).

Физико-химический механизм действия ионизированного воздуха обусловлен изменением условий взаимодействия контактных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом, что проявляется в снижении изнашивания его рабочих поверхностей. Активация воздуха электрическим разрядом приводит к его ионизации и насыщению озоном, что, в свою очередь, содействует активизации окислительных процессов и положительно влияет на химическую кинетику реакций в зоне обработки [4]. Кроме того, ионизированный воздух имеет большую проникающую способность по сравнению с СОЖ, что экспериментально доказано при лезвийной обработке [5, 6]. Однако технологическая эффективность ионизированного воздуха как самостоятельного СОТС по сравнению с СОЖ при алмазном выглаживании может быть ограничена его недостаточными пластифицирующими свойствами. Компенсировать этот недостаток позволяет комбинированная подача ионизированного воздуха вместе с традиционными СОЖ. Такое комбинирование возможно по двум схемам.

Первая заключается в использовании традиционного охлаждения и дополнительного введения в зону обработки струи ионизированного воздуха. Это способствует увеличению толщины защитной пленки за счет активизации окислительных процессов и не сопровождается ростом контактной температуры вследствие интенсивного дополнительного охлаждения струей воздуха.

Вторая схема основана на применении мелкодисперсной аэрозоли СОЖ, подготовленной с использованием высокочастотного ультразвукового генератора типа "Вулкан-1" (частота ультразвуковых колебаний 2,64 МГц [7]) и подаваемой в зону обработки на основе ионизированного воздуха. Мелкодисперсные частицы СОЖ очень малы (диаметр 4—8 мкм) и, попадая на разогретую поверх-

ность обрабатываемого материала и инструмента, легко испаряются, интенсивно поглощая дополнительное количество теплоты. Электризация мелкодисперсных частиц аэрозоли СОЖ при взаимодействии с ионизированным воздухом приводит к увеличению приращения их поверхностной энергии и, следовательно, еще большему их охлаждению [1].

Для количественной оценки эффективности предложенных схем охлаждения в процессе обработки исследовали их влияние на составляющую силы выглаживания P_z и некоторые параметры качества поверхности — среднее арифметическое отклонение профиля Ra и микротвердость H_{100} . Эксперименты проводили на специально разработанной установке, смонтированной на базе токарно-винторезного станка УТ16-ПМ, оснащенной устройствами для измерения составляющих силы выглаживания на базе серийно выпускаемых динамометра УДМ-100, усилителя 8АНЧ-26М и светолучевого осциллографа "Нева-МТ-1". Наложение ультразвуковых колебаний на алмазный выглаживатель осуществляли с помощью ультразвукового генератора "Техма-2" с частотой 18,6 кГц и амплитудой 6 мкм [7]. Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из коррозионно-стойкой подшипниковой стали 95Х18ШТ и титанового сплава ВТ3-1 диаметром 40 мм и длиной 220 и 180 мм соответственно, а также образцах из низколегированной стали 40Х диаметром 52 мм и длиной 160 мм. В качестве деформирующего инструмента использовали алмазный выглаживатель с радиусом рабочей части 1,5 мм.

Окружная скорость при обработке заготовок из стали 95Х18ШТ и титанового сплава ВТ3-1 $v = 40$ м/мин, из стали 40Х — 52 м/мин; продольная подача $S_{пр} = 0,036$ мм/об, нагрузка на алмазный выглаживатель $P_y = 30$ Н. В качестве СОТС применяли индустриальное масло И-20А. СОТС в зону выглаживания подавали различными способами: вручную на поверхность заготовки перед обработкой; в виде мелкодисперсной аэрозоли индустриального масла [7]; подача ионизированного воздуха через специальное сопло [6]; нанесением на поверхность заготовки масляных СОТС вручную перед обработкой с дополнительным охлаждением ионизированным воздухом в процессе обработки; подача масляных СОТС в виде аэрозоли на основе ионизированного воздуха.

Результаты некоторых экспериментальных исследований влияния способа подачи СОТС на параметры эффективности ультразвукового АВ с наложением УЗК при обработке заготовок из титанового сплава ВТ3-1 приведены на рис. 1—3 и в таблице.

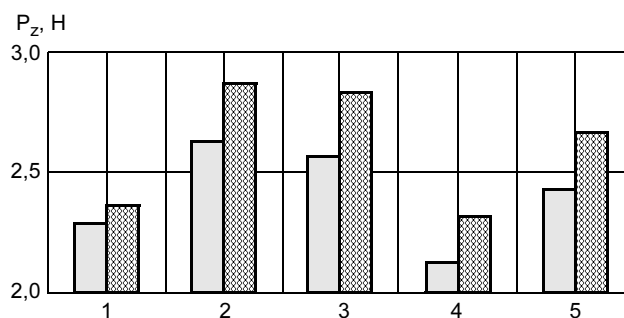


Рис. 1. Влияние вида СОТС и способа его подачи в зону обработки при ультразвуковом алмазном выглаживании на касательную составляющую силы выглаживания P_z при обработке заготовок из сталей 95Х18ШТ (■) и 40Х (▨): 1 — масло И-20А; 2 — ионизированный воздух; 3 — аэрозоль масла И-20А; 4 — масло И-20А + ионизированный воздух; 5 — аэрозоль масла И-20А на основе ионизированного воздуха

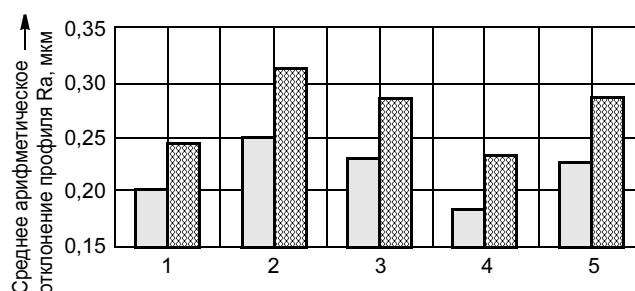


Рис. 2. Влияние вида СОТС и способа его подачи в зону обработки при ультразвуковом алмазном выглаживании на среднее арифметическое отклонение профиля поверхности заготовки Ra (обозначения — см. рис. 1)

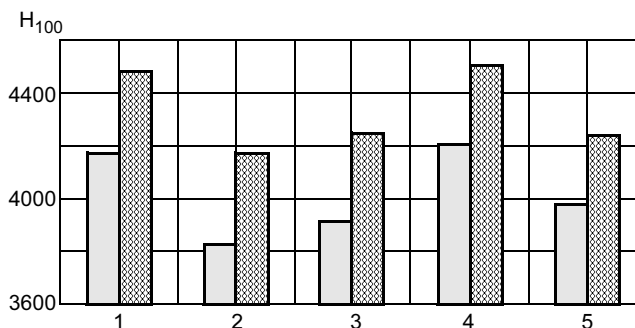


Рис. 3. Влияние вида СОТС и способа его подачи в зону обработки при ультразвуковом алмазном выглаживании на микротвердость поверхности заготовки H_{100} (обозначения — см. рис. 1)

Контролируемый параметр процесса АВ и качества обработанной поверхности	СОТС	
	Масло И-20А	Масло И-20А + ионизированный воздух
Касательная составляющая силы выглаживания P_z , Н	1,2	1,09
Среднее арифметическое отклонение профиля Ra , мкм	0,715	0,704
Микротвердость поверхности H_{100} , МПа	4682	4748

В процессе исследований установлено, что наименьшие значения P_z и Ra и наибольшее значение параметра H_{100} зафиксированы при использовании предварительно нанесенного на поверхность заготовки перед обработкой индустриального масла И-20А с подачей в контактную зону ионизированного воздуха в процессе АВ. При этом использование в качестве дополнительного СОТС ионизированного воздуха уменьшает P_z при обработке покрытых пленкой масла И-20А заготовок из стали 95Х18ШТ на 7,5 %, стали 40Х — на 2 %, титанового сплава ВТ3-1 — на 9,2 % (см. таблицу) по сравнению с обработкой с использованием в качестве СОТС только индустриального масла. Одновременно уменьшилось среднее арифметическое отклонение профиля Ra при ультразвуковом выглаживании образцов из стали 95Х18ШТ на 8,5 %, стали 40Х — на 4,5 %, титанового сплава ВТ3-1 — на 1,5 %. Микротвердость поверхности заготовки при обработке сталей 95Х18ШТ и 40Х практически не изменилась. Эти явления могут быть объяснены возникновением на поверхности заготовки устойчивых к действию теплосиловых факторов оксидных пленок, которые уменьшают интенсивность адгезионных процессов, что проявляется в уменьшении силы выглаживания и высотных параметров шероховатости поверхности обработанных заготовок. Большая эффективность дополнительной подачи ионизированного при УЗ-выглаживании образцов из стали 95Х18ШТ и сплава ВТ3-1 по сравнению с обработкой образцов из стали 40Х объясняется, вероятно, склонностью данных материалов к адгезионному взаимодействию с алмазом. Дополнительное введение ионизированного воздуха в зону обработки незначительно влияет на увеличение микротвердости поверхности обработанной заготовки. Вероятно, молекулы кислорода не проникают вглубь поверхностного слоя заготовки во время обработки, а создают оксиды в очень тонком поверхностном слое. Можно предположить, что вследствие этого число дефектов кристаллической решетки металла в поверхностном слое не увеличивается, а поэтому и не увеличивается микротвердость поверхности обработанной заготовки.

Обработка заготовок с использованием в качестве СОТС только ионизированного воздуха без предварительного нанесения индустриального масла, как и ожидалось, показала худшие результаты. Отмечено увеличение параметра шероховатости Ra , касательной составляющей силы выглаживания P_z , уменьшение микротвердости поверхности H_{100} . Это подтвердило недостаточные смазочные и диспергирующие свойства ионизированного воздуха, необходимые для эффективной обработки, поскольку при использовании в качестве СОТС индустриального масла дополнительное упрочнение

поверхностного слоя происходит, вероятно, вследствие эффекта Ребиндера. При этом некоторое количество жидкости, попадая в поры и микротрещины поверхностного слоя, оказывает на материал заготовки расклинивающее действие, облегчая тем самым процесс пластической деформации, а также уменьшая адгезионную составляющую коэффициента трения [7]. Этот эффект усиливается при воздействии УЗК на процесс обработки.

УЗ-выглаживание с подачей СОТС в виде аэрозоли характеризуется некоторым увеличением параметров шероховатости Ra и касательной составляющей силы выглаживания P_z , а также уменьшением микротвердости поверхности H_{100} . Это можно объяснить тем, что при обработке поверхностным пластическим деформированием поверхность контакта заготовки с выглаживателем сильно пластифицирована, что отражается на уменьшающихся размерах капилляров, по которым проникает распыленная СОЖ в зону обработки. В свою очередь, это снижает проникающую способность частиц аэрозолей СОТС. Другое преимущество аэрозоли — небольшой расход — не может быть в полной мере реализовано в этом случае при алмазном выглаживании. Традиционный способ выглаживания с использованием в качестве СОТС индустриального масла, нанесенного на поверхность заготовки перед обработкой, отличается также небольшим расходом СОТС (вследствие высокой вязкости индустриальное масло почти не разбрызгивается с поверхности заготовки при малых окружных скоростях заготовки). При обработке АВ с высокими окружными скоростями эффективность применения аэрозоли, вероятно, увеличится. Однако в этом случае могут проявиться недостаточные охлаждающие свойства аэрозоли.

Применение активированной аэрозоли за счет контактного взаимодействия с ионизированным воздухом несколько повышает ее проникающую способность. Вследствие этого показатели качества поверхностного слоя обработанной заготовки немного увеличиваются, однако все же оказываются несколько худшими, чем с применением индустриального масла. Большая эффективность этого способа, вероятно, будет проявляться в том случае, когда частицы СОЖ удастся диспергировать до размеров капилляров, образуемых в результате активной пластической деформации при алмазном выглаживании. Однако это неизбежно повлечет удорожание необходимого оборудования в связи с увеличением энергетических затрат на диспергирование вязкой жидкости.

Таким образом, в результате исследований установлено, что использование ионизированного и

озонированного коронным разрядом воздуха для активации, применяемой в процессе алмазного выглаживания СОЖ, позволяет улучшить условия работы алмазного инструмента, повысить его стойкость, а также производительность обработки в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Торбило В. М. Алмазное выглаживание. М.: Машиностроение, 1972. 105 с.
2. Экологически чистые смазочно-охлаждающие технологические средства / В. Н. Латышев, А. Г. Наумов, А. Е. Бушуев и др. // Вестник машиностроения. 1999. № 7. С. 32—35.
3. Подураев В. Н., Суворов А. А., Овсепян Г. С. Улучшение охлаждающих свойств СОЖ при возбуждении УЗК // Станки и инструмент. 1975. № 6. С. 31—32.
4. Хворостухин Л. А., Волков А. Ф., Бибаев В. Н. Алмазное выглаживание нержавеющей стали (применительно к стали 12Х18Н9Т) // Известия вузов. Машиностроение. 1967. № 11. С. 131—135.
5. Кириллов А. К. Экологически безопасное "сухое" резание при металлообработке // Стружка. 2003. № 4. С. 26—27.
6. Петрова В. Д., Татаринов А. С. Механическая обработка в среде охлажденного ионизированного воздуха // Проблемы эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности. М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1992. С. 124—130.
7. Киселев Е. С. Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.
8. Смазочно-охлаждающие технологические средства и их применение при обработке резанием: Справочник / Под общ. ред. Л. В. Худобина. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

В. С. ИВАНОВ, канд. техн. наук
МГТУ им. Н. Э. Баумана

Векторное моделирование способов многолезвийной обработки

Как известно, процесс резания осуществляется за счет движения резца относительно заготовки. При этом форма и взаиморасположение заготовки и режущего инструмента, вид и распределение формообразующих движений, соотношения между ними могут быть обеспечены различным образом, что определяет многообразие методов обработки и процессов формообразования детали.

Применительно к формообразованию многолезвийным инструментом круглых поверхностей, т. е. поверхностей с направляющей в виде окружности, наиболее распространенными являются ме-

тоды, при которых заготовка и(или) инструмент получают вращательное движение (точение, фрезерование, сверление, зенкерование и др.).

Цель данной работы — определение и формализация компоновочных и кинематических факторов, определяющих процесс формообразования деталей.

Среди способов многолезвийной обработки поверхностей вращения наиболее распространенными являются точение и фрезерование, позволяющие обрабатывать изделия различной формы (рис. 1).

Для анализа кинематической структуры формообразования введем символическую формализацию формообразующих движений. Первая буква "Ф" обозначает принадлежность движения к процессу формообразования. Индекс при ней обозначает технологический признак, указывающий на доминирующее участие движения в формировании скорости резания v или подачи s . Далее в скобках указывается тип движения: вращательное (В) или поступательное (П), а числовой индекс обозначает сквозную нумерацию движений.

При фрезеровании¹ главное вращательное движение $\Phi_v(B_1)$, определяющее скорость резания, сообщают многолезвийному инструменту — фрезе, медленное вращение $\Phi_s(B_2)$, определяющее круговую подачу, сообщают детали (рис. 2, а, б). Поступательное движение осевой или радиальной

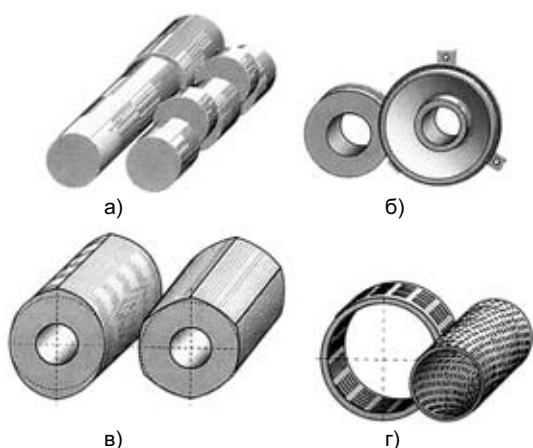


Рис. 1. Типовые детали, получаемые многолезвийным точением и фрезерованием: а — гладкие и колеччатые валы; б — кольца и фланцы; в — циклоидальные многогранники; г — щелевые фильтры

¹А. с. 902987 (СССР).

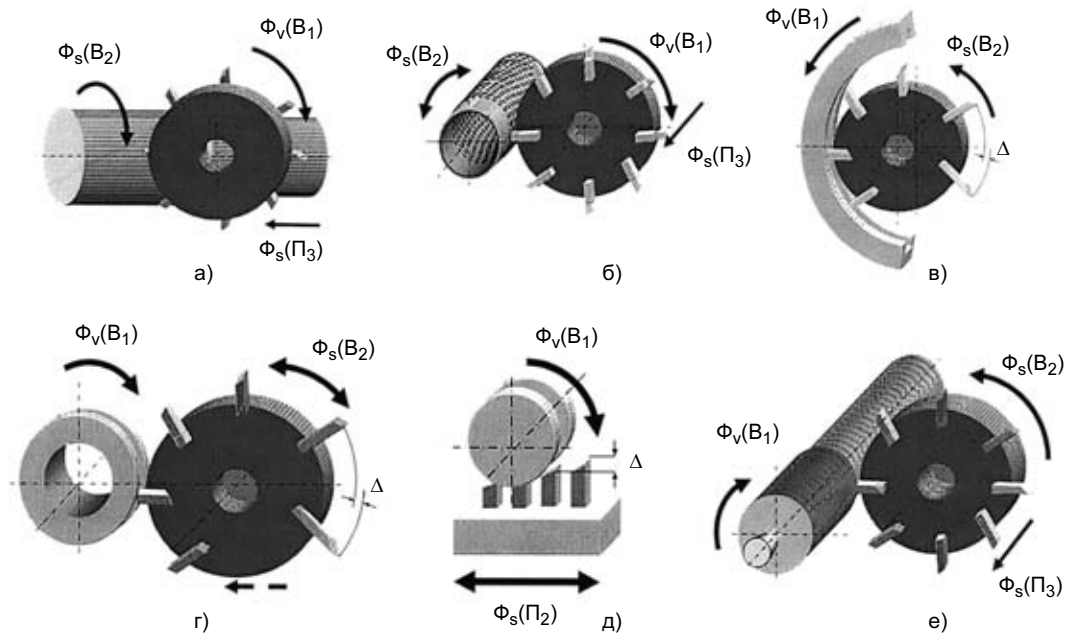


Рис. 2. Кинематическая структура формообразования способов многолезвийной обработки тел вращения: а, б — фрезерование; в, д — тангенциальное точение; е — фрезоточение

подачи $\Phi_s(\Pi_3)$, как правило, сообщают инструменту. В соответствии с принятыми обозначениями кинематическая структура формообразования при фрезеровании может быть отражена структурной формулой $\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2), \Phi_s(\Pi_3)$, показывающей, что в процессе формообразования детали участвуют три движения. Два из них являются вращательными и доминируют в формировании соответственно скорости резания и круговой подачи, а третье движение подачи является поступательным.

Тангенциальное точение занимает промежуточное положение между классическим точением и фрезерованием. Кинематическая структура тангенциального точения содержит в общем случае два вращательных движения (рис. 2, в, г). Одно из них — главное и определяющее скорость резания $\Phi_v(B_1)$ — сообщают детали, а второе, определяющее круговую подачу $\Phi_s(B_2)$, сообщают инструменту² [1]. В частном, предельном, случае движение тангенциальной подачи может быть прямолинейным (рис. 2, д).

В этом случае структура формообразующих движений записывается в виде $\Phi_v(B_1), \Phi_s(\Pi_2)$. Последовательный съём припуска обеспечивают конструктивно за счет установки резцов на инструменте с разным вылетом — попутное (встречное) точение или кинематически, за счет прямолинейного

движения многолезвийного инструмента со скоростью подачи (рис. 2, е).

Кинематическая структура схем обработки при тангенциальном точении, как и при фрезеровании в общем виде, содержит два вращательных движения, сообщаемых детали и заготовке, и может быть отражена структурной формулой $\Phi_v(B_1), \Phi_s(B_2), \Phi_s(\Pi_3)$.

Тангенциальное точение занимает промежуточное положение между классическим точением и фрезерованием.

С точки зрения формирования профиля детали тангенциальное точение и фрезерование относятся к циклоидальным способам формообразования, так как получаемый профиль детали ограничен циклоидами.

Основным признаком, определяющим термин циклоидальное формообразование, является циклоидальная форма траектории движения резца относительно центра O_d профиля детали.

Вид каждой траектории зависит от взаимного расположения шпинделей детали и инструмента относительно зоны обработки.

На рис. 3 приведены различные варианты такого расположения, соответствующие различным видам технологического зацепления детали 1 и инструмента 2. Зона I соответствует внешнему зацеплению, зона II — внутреннему зацеплению, при котором диаметр детали больше диаметра инструмента (обработка отверстий), зона III — внутреннему зацеплению, при котором диаметр де-

²А. с. 184580 (СССР).

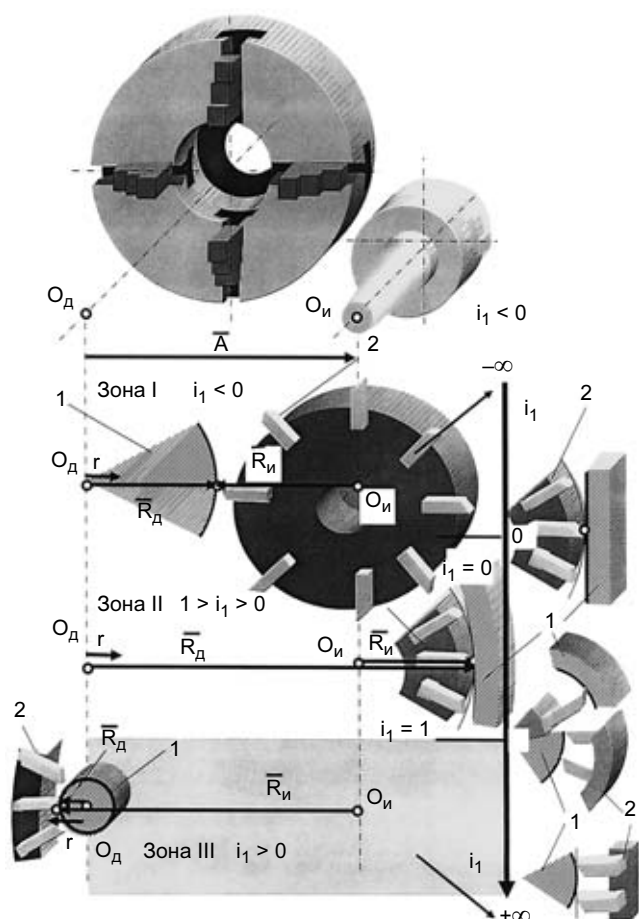


Рис. 3. Векторная модель схем технологического зацепления

тали меньше диаметра инструмента (охватывающая схема обработки валов).

При внешнем различии приведенные схемы являются формами проявления внутреннего содержания компоновки шпинделей относительно зоны обработки, а процессы формообразования для них должны подчиняться единым закономерностям.

С целью однозначного математического описания законов формообразования для различных схем циклоидальной обработки формализуем компоновку в виде системы векторов, используя методы векторной алгебры [2, 3].

Для этого зададимся полярной системой координат, связанной с центром O_d детали. Выбор полярной системы основан на специфике обрабатываемых поверхностей, имеющих круглый профиль, и систем измерения (кругломеры, формтестеры), работающих также в полярной системе координат. Положительное направление координатной оси зададим единичным вектором r , направленным из центра O_d в полюс p технологического зацепления и расположенным в соответствии с рис. 1 на линии

центров $O_d O_w$. В соответствии с принятыми обозначениями компоновку шпинделей относительно зоны обработки можно представить системой векторов: A — вектор расположения центра инструмента O_w относительно начала координат O_d , направленный из центра O_d в точку O_w и численно равный межцентровому расстоянию A ; $\bar{R}_d$ — вектор расположения полюса зацепления p относительно O_d , направленный из центра O_d в точку p и численно равный номинальному радиусу детали; $\bar{R}_w$ — вектор расположения полюса p относительно точки O_w и численно равный радиусу инструмента.

Векторы компоновки можно представить через единичный вектор r :

$$\bar{A} = Ar, \quad \bar{R}_d = R_d r, \quad \bar{R}_w = r R_w, \quad (1)$$

где A, R_d, R_w — координаты (алгебраические проекции на координатную ось) соответствующих векторов.

Система векторов $\bar{A}, \bar{R}_d, \bar{R}_w$ является замкнутой и удовлетворяет соотношению

$$\bar{A} + \bar{R}_w = \bar{R}_d. \quad (2)$$

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

$$A + R_w = R_d. \quad (3)$$

Из соотношения (3) видно, что независимыми являются две из трех величин, а третья является их линейной комбинацией.

Для анализа компоновок удобнее рассматривать их характеристики в приведенном виде. Для этого параметры соотношения (3) приводятся к радиусу детали. Приведенные параметры компоновок можно записать в следующем виде:

$$\check{R}_d = R_d / R_d = 1; \quad \check{A} = A / R_d; \quad \check{R}_w = R_w / R_d. \quad (4)$$

С учетом принятых обозначений (4) выражение (3) представляется в виде:

$$\check{A} + \check{R}_w = 1. \quad (5)$$

Для станков циклоидальной обработки за независимые координаты можно принять $\check{R}_d$, равный

единице, и $\check{R}_и$ — приведенный радиус инструмента, величина которого определяет соотношение радиусов инструмента и детали, а направление — схему технологического зацепления. Таким образом, характеристикой технологической компоновки, полностью определяющей схему зацепления детали и инструмента, является вектор $\check{R}_и$ (приведенная координата инструмента).

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

$$i_1 = \check{R}_и = R_и/R_d. \quad (6)$$

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

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

Из множества значений i_1 можно выделить зоны *I*, *II*, *III* (см. рис. 3), в которых компоновка шпинделей соответствует различным схемам технологического зацепления. Зона *I* ($-\infty < i_1 < 0$) соответствует схеме внешнего зацепления выпуклых профилей детали и инструмента, зона *II* ($0 < i_1 < 1$) — внутреннему зацеплению вогнутого профиля детали и выпуклого профиля инструмента (обработка отверстия), зона *III* ($1 < i_1 < +\infty$) — схеме зацепления выпуклого профиля детали и вогнутого профиля инструмента (охватывающая схема). Под выпуклым понимается профиль, касательная к которому не пересекает ограниченную им фигуру, под вогнутым — профиль, касательная к которому пересекает ограниченную им фигуру.

Возможны частные случаи зацеплений, соответствующие границам зон *I*, *II*, *III*: граница *I—II* ($i_1 = 0$) соответствует зацеплению выпуклого профиля инструмента с прямолинейным профилем детали ($R_d \rightarrow \infty$) — обработка плоскостей, граница *II—III* ($i_1 = 1$) — схема зацепления выпукло-вогнутых профилей детали и инструмента одинаковой кривизны — осевые методы обработки, пределы $i_1 = \pm\infty$ соответствуют зацеплению выпуклого профиля детали и прямолинейного профиля инструмента — обработка валов при прямолинейной тангенциальной подаче инструмента.

Варьируя i_1 , можно синтезировать все представленные на рис. 3 схемы технологического зацепления. Таким образом, геометрическое передаточное отношение i_1 однозначно определяет компоновку

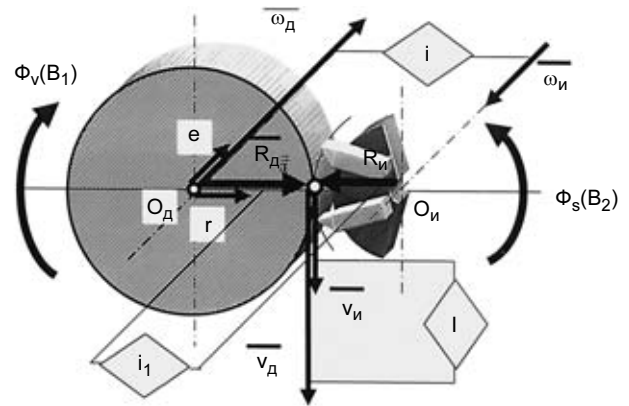


Рис. 4. Векторная модель способа многолезвийной обработки

рабочих органов станка относительно зоны обработки или схему технологического зацепления.

Кинематическими факторами процессов циклоидального формообразования являются вращательные движения $\Phi_v(B_1)$ и $\Phi_s(B_2)$, сообщаемые шпинделям (рис. 4). Характеристиками движений являются векторы угловых скоростей $\bar{\omega}_d$ и $\bar{\omega}_и$, определяемые величиной и направлением. При параллельном расположении шпинделей векторы ω_d и $\omega_и$ коллинеарны, т. е. расположены вдоль параллельных осей. Расстояние между линиями действия векторов равно A .

Задаваясь координатной осью угловых скоростей с единичным вектором e , можно записать

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

где ω_d и $\omega_и$ — координаты соответствующих векторов на оси ω или кинематические координаты. Соотношение вращений $\Phi_v(B_1)$ и $\Phi_s(B_2)$ шпинделей детали и инструмента можно представить кинематическим передаточным отношением координат ω_d и $\omega_и$

$$i = \omega_d/\omega_и. \quad (9)$$

В зависимости от значения i можно выделить зоны однонаправленного ($i > 0$) и разнонаправленного ($i < 0$) вращения шпинделей. Границе зон ($i = 0$) соответствует вариант с отсутствием вращения шпинделя детали. Предельному значению ($i = \infty$) соответствует вариант обработки без вращения шпинделя инструмента, например обычное точение.

Совокупность геометрического и кинематического передаточных отношений характеризует соотношение по величине и направлению окружных

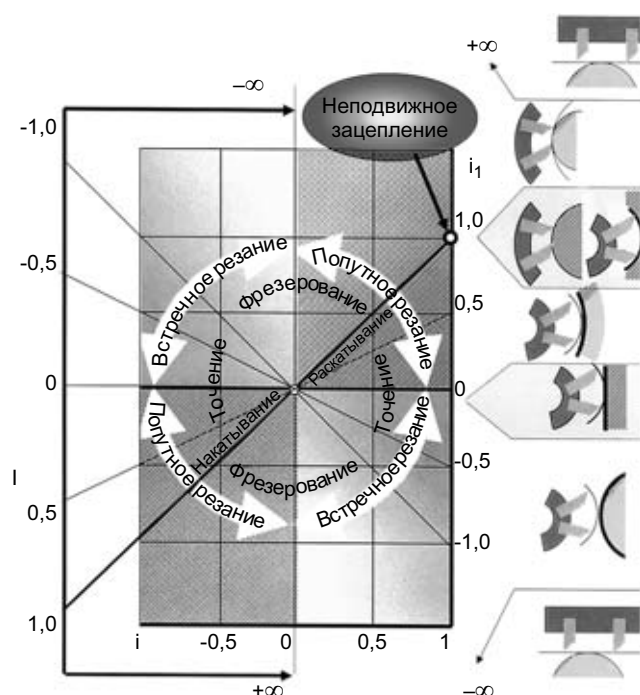


Рис. 5. Поле передаточных отношений и синтезируемые в нем методы обработки

скоростей сопрягаемых профилей детали и инструмента в полюсе p технологического зацепления.

Окружные скорости детали и инструмента определяются векторными уравнениями

$$\bar{v}_d = \bar{\omega}_d \bar{R}_d; \quad \bar{v}_i = \bar{\omega}_i \bar{R}_i. \quad (10)$$

При попарной коллинеарности векторов $(\bar{R}_d, \bar{R}_i)$, $(\bar{v}_d, \bar{v}_i)$, $(\bar{\omega}_d, \bar{\omega}_i)$ в полюсе зацепления для соотношения линейных скоростей движения детали и инструмента

$$I = \frac{v_i}{v_d} = \frac{\omega_i}{\omega_d} \frac{R_i}{R_d} = \frac{i_1}{i}. \quad (11)$$

Передаточные отношения i_1 , i , I характеризуют как схему технологического зацепления, так и соот-

ношение угловых и линейных скоростей, т. е. определяют способ многолезвийной обработки.

На рис. 5 представлено поле передаточных отношений $\Omega(i_1, i)$. Каждая точка в этом поле может быть представлена вектором-столбцом передаточных отношений $\begin{bmatrix} i_1 \\ i \end{bmatrix}$, однозначно характеризующим

способ обработки. Действительно, координата i_1 характеризует схему технологического зацепления, i — соотношение угловых скоростей, I — соотношение линейных скоростей движений.

На числовой оси I можно выделить зоны, соответствующие различным методам обработки: $I < 0$ — методы со встречным движением поверхностей детали и инструмента (схемы встречного резания); $I > 0$ — методы с попутным движением поверхностей детали и инструмента (схемы попутного резания).

Зона $0 < |I| \ll 1$ соответствует условиям точения, $1 \ll |I| < \infty$ — фрезерования. Промежуточные значения I соответствуют методам обработки некруглых поверхностей, частный случай $I = 1$ соответствует методам обработки без резания — накатыванию и раскатыванию. Точка $I = 1, i_1 = 1, i = 1$ соответствует зацеплению профилей без относительного кругового движения, например, при осевом протягивании, долблении, калибровании.

Таким образом, в поле передаточных отношений $\Omega(i_1, i)$ могут быть синтезированы различные методы и схемы обработки, а комбинация передаточных отношений является комплексной характеристикой компоновочно-кинематического варианта обработки и содержит исходную информацию для определения и исследования выходных параметров процесса формообразования деталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ермаков Ю. М. Технология и станки тангенциального точения. М.: Машиностроение, 1979. 152 с.
2. Бугров Я. С., Никольский С. М. Элементы линейной алгебры и аналитической геометрии. М.: Наука, 1980. 176 с.
3. Корн Г., Корн К. Справочник по математике для научных работников и инженеров. М.: Наука, 1974. 832 с.

В. М. ШУМЯЧЕР, д-р техн. наук, А. В. КАДИЛЬНИКОВ, аспирант

Волжский институт строительства и технологий (филиал) Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета

Влияние формы поверхности шлифовального круга и ориентации абразивного зерна в связке на начало процесса стружкообразования

До недавнего времени повышение эффективности процесса шлифования осуществлялось путем оптимизации состава абразивного инструмента, технологии его изготовления, а также режимов обработки [1, 2]. При этом форма зерна считалась неуправляемой и воспринималась такой как есть. Между тем каждое зерно в зависимости от технологии его получения имеет индивидуальную форму поверхности и вследствие хаотического расположения в связке обладает индивидуальными режущими свойствами, совокупность которых для зерен всего ансамбля активной части абразивного круга определяет качество инструмента. Накопленные знания о форме зерна и его ориентации в связке не позволяют выдать общие рекомендации для повышения эффективности шлифования.

В результате проведенных исследований установлено, что существенную роль в процессе стружкообразования играет угол β_0 наклона к поверхности обрабатываемого материала нормали n , проведенной к поверхности зерна в крайней точке контакта (рис. 1). Причем, чем меньше β_0 , тем процесс эффективнее.

На величину угла β_0 существенно влияет глубина внедрения режущего элемента в материал, которая за время контакта не остается постоянной.

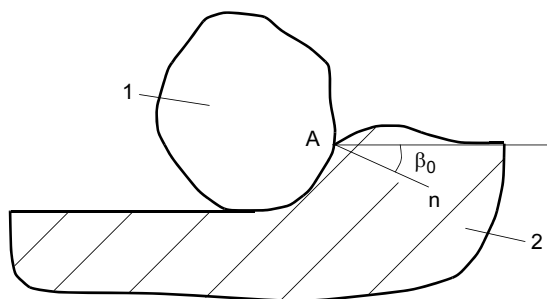


Рис. 1. Взаимодействие абразивного зерна (1) и обрабатываемого материала (2)

В основе математического аппарата для определения мгновенной глубины резания использовали предложение [3] рассматривать режущий инструмент при шлифовании периферией круга как геометрическое множество точек, принадлежащих вращающейся окружности с перемещающимся центром в направлении продольной подачи (рис. 2).

Точки A и B соответствуют вершинам двух зерен, последовательно вступающих в зону контакта. Пусть в момент времени t точки O , A и B займут положения O_1 , A_1 и B_1 соответственно так, что точка B будет принадлежать отрезку O_1A_1 . Тогда мгновенная величина внедрения абразивного зерна

$$h = A_1 B.$$

Определив длину отрезка A_1B , после преобразований получим

$$h = \frac{\varphi_0(1 \pm \varepsilon_\varphi)}{\frac{1}{R(1 \pm \varepsilon_\omega)} + \frac{\omega}{v}} \operatorname{tg} \omega t, \quad (1)$$

где φ_0 — угол между лучами OA и OB ; R — радиус абразивного круга; v — скорость подачи; ω — скорость вращения круга; ε_R и ε_ω — коэффициенты,

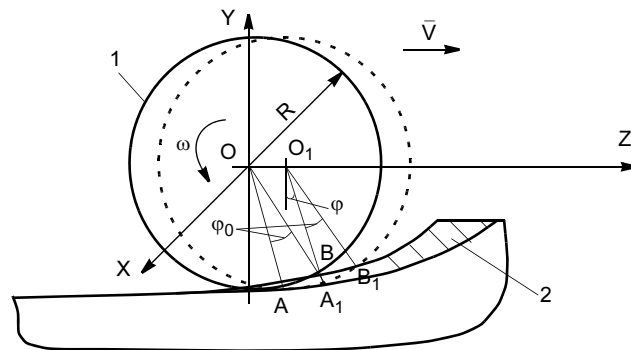


Рис. 2. Определение мгновенной величины заглупления зерна: 1 — абразивный круг; 2 — слой материала, удаляемый зерном за время одного контакта

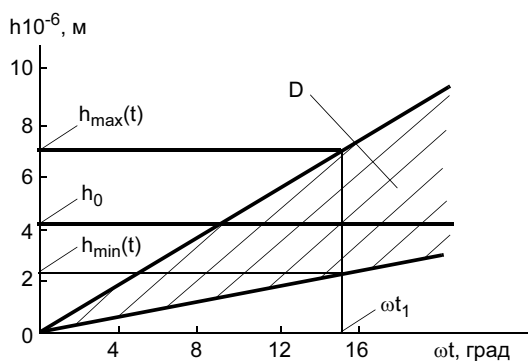


Рис. 3. Мгновенная величина заглупления зерна

учитывающие погрешность расположения зерен, а также их смещение относительно друг друга вдоль оси OX .

При выводе зависимости (1) использовали математические допущения, не позволяющие ее использование при углах $\varphi > 15^\circ$. При $\varphi = 15^\circ$ формула верна с точностью около 3 %. Такое ограничение вполне применимо при шлифовании, например, кругом диаметром 200 мм и $\varphi = 15^\circ$, при этом толщина снимаемого припуска составляет около 3,5 мм.

На рис. 3 показано, как при плоском шлифовании изменяется заглупление в течение единичного акта микрорезания. Зависимость получена по формуле для случая $R = 100$ мм, $\omega = 100$ рад/с, $v = 0,02$ м/с, $\varphi_0 = 5^\circ$, $\varepsilon_R = 0,01$, $\varepsilon_\varphi = \pm 0,5$.

Диапазон возможных значений h имеет широкий разброс (см. рис. 3 — заштрихованная область), обусловленный случайным характером расположения зерен на рабочей поверхности круга. В любой произвольный момент времени зерно может быть внедрено на любую глубину из диапазона $[h_{\min}(t); h_{\max}(t)]$. Если резание осуществляется при глубине внедрения h_p , соответствующей определенному углу β_p , то очевидно, что при данных режимах обработки часть зерен, внедренных на глубину $h \in [h_p; h_{\max}(t)]$, будет снимать стружку, а другая, для которой $h \in [h_{\min}(t); h_p]$ — только пластически деформировать материал. Очевидно, что сужение области разброса значений h позволит поставить абразивные зерна в одинаковые условия эксплуатации, что, в свою очередь, повысит эффективность применения инструмента, а также позволит с большей точностью прогнозировать возникающие при шлифовании усилия и качество получаемой поверхности. Единственным способом сужения области D является упорядоченное расположение зерен на рабочей поверхности круга.

Еще один путь увеличения количества режущих зерен заключается в снижении h_p . Это можно осу-

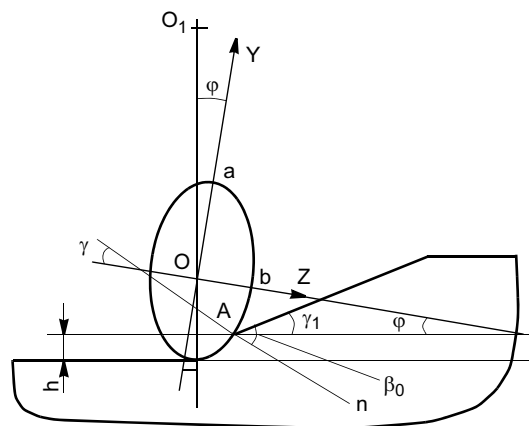


Рис. 4. Определение мгновенного значения угла β_0

ществить двумя способами. Первый заключается в повышении скорости резания, что увеличивает значение угла β_p , а значит уменьшает начальную глубину резания h_p . Второй способ предполагает использование формы и ориентации зерна в связке путем минимизации угла β_0 .

Для случая эллипсоидной формы зерна получены зависимости, позволяющие определить угол β_0 в зависимости от мгновенной величины h съема материала и угла наклона φ большей полуоси к отрезку OO_1 , соединяющего центры абразивного круга и эллипсоида (рис. 4).

Искомый угол

$$\beta_0 = \gamma + \varphi + \gamma_1,$$

где γ — угол наклона нормали к оси OZ ; γ_1 — угол, обусловленный изменением глубины внедрения зерна за время контакта.

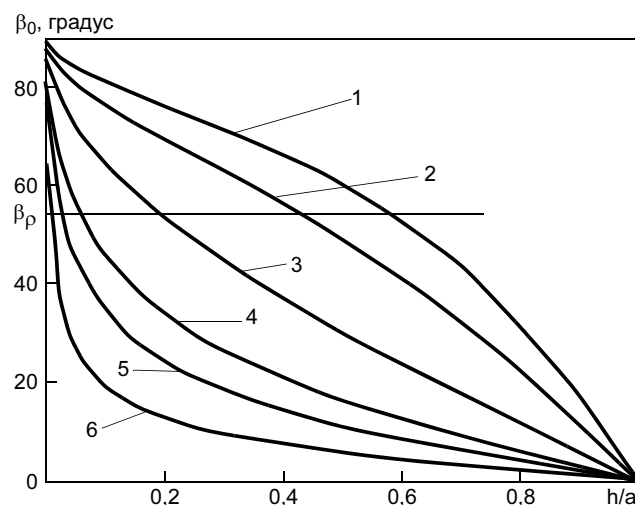


Рис. 5. Изменение угла β_0 в зависимости от значения h для случая $\varphi = 0$: a/b равно 1/3 (1), 1/2 (2), 1 (3), 2 (4), 3 (5) и 6 (6)

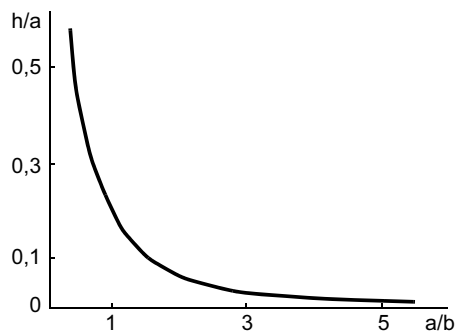


Рис. 6. Зависимость начала стружкообразования от соотношения большего и меньшего линейных размеров абразивного зерна эллипсоидной формы, ориентированного под углом $\varphi = 0^\circ$ ($\beta_0 = 54^\circ$)

На рис. 5 приведены графики изменения угла β_0 за время одного контакта зерна с обрабатываемым материалом для различных соотношений a/b максимального и минимального размеров при $\varphi = 0$ (a — фиксировано). Видно, что в начальный момент взаимодействия $\beta_0 = 90^\circ$ для всех случаев. В дальнейшем его значение уменьшается, причем характер уменьшения зависит от соотношения a/b . Начало процесса резания (значение β_p) наступит раньше для случая большего отношения a/b (в рассматриваемом примере это случай $a/b = 6$). Считается, что начало резания начинается при глубине внедрения $h/a \approx 0,2$. В этом случае для шара получаем $\beta_0 \approx 54^\circ$. Это будет началом процесса стружкообразования для всех соотношений a/b . Проведя горизонтальную линию, соответствующую значению $\beta_0 \approx 54^\circ$, получаем зависимость, показывающую, как изменяется начало стружкообразования при изменении соотношения осей эллипса (рис. 6).

Наибольшей эффективностью (см. рис. 6) обладает зерно вытянутой формы, причем его большая ось должна быть ориентирована по радиусу круга. Так, например, для зерна, ориентированного по радиусу круга с отношением максимального и минимального размеров, равного трем, началу резания соответствует заглубление примерно в 15 раз меньше, чем для такого же зерна, ориентированного по радиусу круга меньшей осью (данное положение хорошо согласуется с утверждением А. И. Грабченко [4] о том, что абразивное зерно должно обладать минимальной изометричностью формы и быть ориентированным). Можно сформулировать по-другому: началу резания для зерна с соотношением $a_1/b_1 = 3/1$ в случае ориентации большей полуосью по радиусу абразивного круга будет соответствовать такая же глубина внедрения, как для зерна с соотношением $a_2/b_2 = 3/1$, ориентированного по радиусу круга меньшей полуосью, но имеющего размер a_2 , в 15 раз меньший, чем размер a_1 первого

зерна. Таким образом, использование такого параметра, как ориентация зерна в связке инструмента, позволяет существенно увеличить допустимый размер абразивных частиц при неизменном результате.

Оптимальный наклон зерна к линии, соединяющей его центр с центром круга, можно определить с помощью графиков, приведенных на рис. 7, 8. При положительных значениях угла его увеличение приводит к смещению начала процесса резания в сторону большей глубины внедрения зерна в обрабатываемый материал, достигая при определенном значении самого неблагоприятного положения с точки зрения начала стружкообразования. Даль-

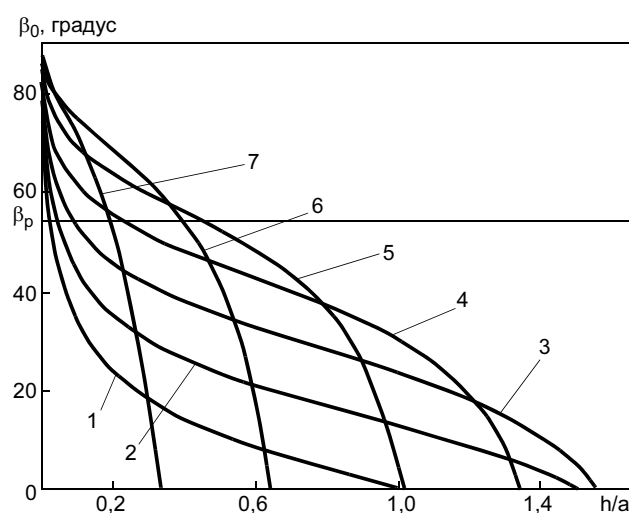


Рис. 7. Изменение угла β_0 в зависимости от значения h для случая $\varphi > 0$ ($a/b = 3$): φ равен 0 (1); 15° (2); 30° (3); 45° (4); 60° (5); 75° (6) и 90° (7)

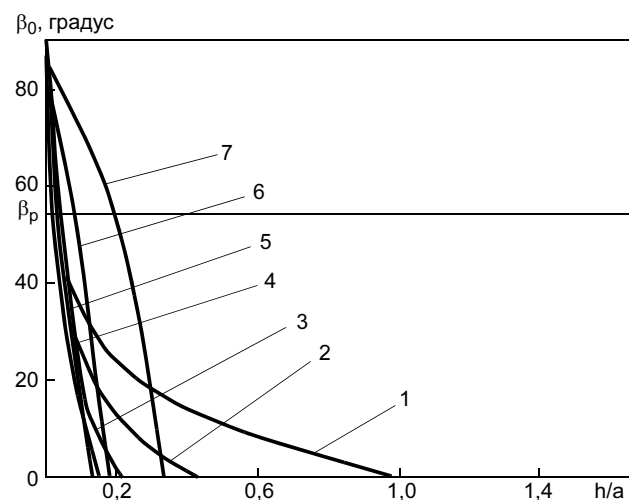


Рис. 8. Изменение угла β_0 в зависимости от значения h для случая $\varphi < 0$ ($a/b = 3$): φ равен 0 (1); -15° (2); -30° (3); -45° (4); -60° (5); -75° (6) и -90° (7)

нейшее его увеличение приводит к уменьшению начальной глубины резания.

Уменьшение угла φ (при $\varphi < 0$) вызывает обратный эффект. Например, при $\beta_0 = 54^\circ$ (см. рис. 8) изменение угла φ от 0 до примерно -45° приводит к смещению начальной глубины резания в сторону меньших значений. Дальнейшее уменьшение угла наклона зерна ухудшает условия начала стружкообразования. Для случая $a/b = 3$ (рис. 9) приведена зависимость заглабления зерна, при котором начинается процесс резания, от угла φ .

Существует область значений угла φ , в пределах которой его изменение практически не сказывается на начальной глубине резания (см. рис. 9). Последняя при этом принимает минимальное значение, а значит ей соответствуют наиболее благоприятные условия для обработки. Для случая $a/b = 3$ и $\beta_0 = 54^\circ$ данной области примерно соответствуют значения $\varphi \in [-60; 0]$. С увеличением скорости взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого материала β_p возрастает, при β_p , равной 70 и 80° , скорости обработки v_p больше. Данные зависимости показывают, что при увеличении v_p область оптимальных значений угла φ расширяется, т. е. при высокой v_p форма поверхности и ориентация зерна сказываются в меньшей степени на начале процесса стружкообразования. Поэтому можно ожидать, что повышение эффективности шлифования от применения зерна изометричной формы при высоких скоростях будет более значительным, чем при низких. Но зерно, форма которого стремится к форме шара, обладает существенным недостатком — малым вылетом вершины из связки инструмента, что является причиной плохого отвода стружки, а следовательно, засаливания круга. Применение ориентированного зерна, обладающего минимальной изометричностью формы поверхности, позволяет устранить данный недостаток.

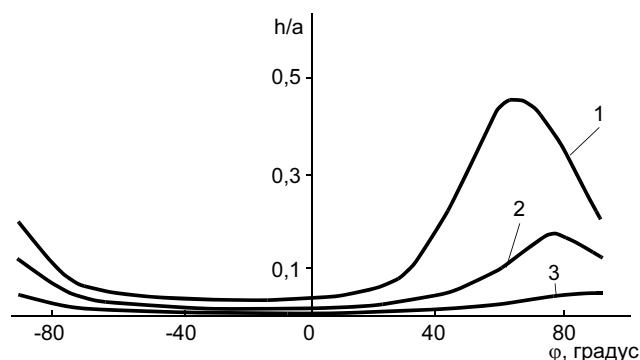


Рис. 9. Зависимость начала стружкообразования от угла ориентации φ абразивного зерна с поверхностью в форме эллипсоида вращения ($a/b = 3$): β_p равен 54 (1), 70 (2) и 80° (3)

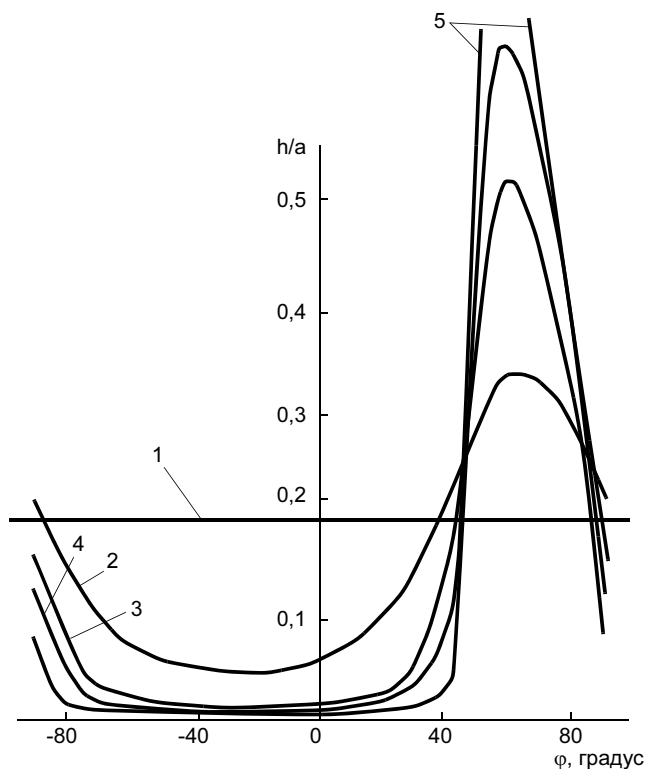


Рис. 10. Зависимость начала стружкообразования от угла ориентации φ абразивного зерна с поверхностью в форме эллипсоида вращения ($\beta_0 = 54^\circ$): a/b равно 1 (1), 2 (2), 4 (3), 6 (4) и 10 (5)

Форма кривой $\frac{h}{a}(\varphi)$ в значительной степени определяется отношением a/b (рис. 10). Анализ графиков позволяет сделать вывод, что с увеличением его значения амплитудные значения данной кривой изменяются в сторону увеличения. При отрицательных значениях угла φ график функции приближается к оси абсцисс, при положительных — наблюдается резкое отклонение в противоположную сторону, что означает увеличение начальной глубины резания. При уменьшении значения a/b разброс значений функции $\frac{h}{a}(\varphi)$ снижается и график приближается к прямой линии, соответствующей случаю $a/b = 1$, т. е. случаю обработки абразивным зерном в форме шара. В то же время отношение a/b практически не влияет на диапазон оптимальных значений угла φ .

Необходимо также обратить внимание на то, что для каждого значения угла φ существует критическая глубина резания, при которой $\beta_0 = 0$. При отрицательных значениях угла β_0 стружка будет отводиться не в боковые стороны от зерна, а в сторону центра абразивного круга и вдавливаясь в связку инструмента, вызывая эффект засаливания. Поэтому необходимо ограничиться положительны-

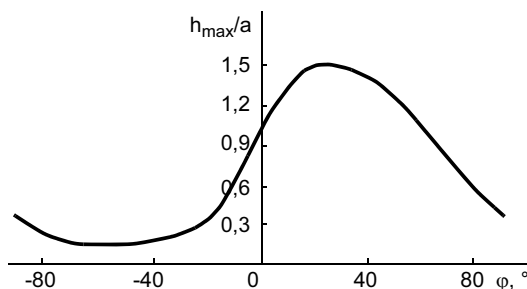


Рис. 11. Зависимость начала стружкообразования от угла ориентации φ абразивного зерна с поверхностью в форме эллипсоида вращения ($a/b = 3$)

ми значениями угла β_0 . Это нужно учитывать при проектировании инструмента, а также назначении режимов обработки. На рис. 11 показано, как изменяется критическая глубина резания в зависимости от угла φ для случая $a/b = 3$. Видно, что максимум глубины резания приходится на положительные

значения. В области минимальных значений критическая глубина внедрения зерна снижается, поэтому при разработке инструмента можно рекомендовать придерживаться верхней части области оптимальных значений угла φ . Для случая, приведенного на рис. 11, это примерно соответствует интервалу $[-20^\circ; 0]$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Байкалов А. К. Введение в теорию шлифования материалов. Киев: Наукова думка, 1978. 207 с.
2. Филимонов Л. Н. Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.
3. Быкадорова О. Г. Повышение эффективности шлифования путем управления процессом взаимодействия абразивного зерна и обрабатываемого металла: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Волгоград, 2005. 15 с.
4. Грабченко А. И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования. Харьков: Вища школа, 1985. 184 с.

Г. В. ЧИРКОВ, инж.

Сарапульский радиозавод

Основные закономерности, влияющие на процесс пропитки абразивных кругов

Структура материала абразивного инструмента характеризуется количественным соотношением объема зерен связки и пор:

$$V_z + V_c + V_p = 100 \%, \quad (1)$$

где V_z , V_c , V_p — соответственно объем зерна, связки и пор (%).

Большинство пор в абразиве имеет выход на поверхность инструмента либо сообщается между собой. Абразивный инструмент представляет собой твердое тело с большим количеством пор-капилляров, имеющих большую протяженность по поверхностного пограничного слоя. Из молекулярной теории физики твердого тела известно, что в этом слое межмолекулярные силы не уравновешены. Поэтому в поверхностном слое абразива имеется избыток свободной энергии и, соответственно, способность абсорбировать и придавать определенную ориентацию веществам, понижающим эту свободную энергию до полного уравновешивания системы.

В качестве импрегнаторов для абразивных инструментов применяется ряд веществ и составов. Наиболее распространенные импрегнаторы приведены в таблице.

Известно несколько способов импрегнирования абразивного инструмента. Простейшим из них является способ погружения. Суть его заключается в том, что абразивный инструмент погружается в расплав или раствор импрегнатора на определенное время, в течение которого поры абразивного инструмента заполняются импрегнатором. При этом температура расплава и абразивного инструмента должна быть примерно одинакова. Этот способ пропитки имеет ряд недостатков, главными из которых являются большая продолжительность импрегнирования и неравномерная пропитка абразивного инструмента по всему объему. Последнее имеет место потому, что в процессе импрегнирования образуются воздушные пробки, закрывающие капилляры и препятствующие доступу импрегнатора.

Оставшийся в порах воздух, перемещаясь по порам, скапливается в верхней части абразива, и этот участок остается непропитанным. С целью исключения данного явления предлагается при подаче в резервуар с абразивным инструментом импрегнатора повышать его уровень со скоростью на 20—30 % меньше, чем скорость капиллярного всасывания его порами. Этот способ отличается производительностью, не требует регулиро-

Импрегнатор	Состояние	Назначение	Примечание
Сера молотая (1 сорт, ГОСТ 124—64)	Расплав, 140—150 °С	Для абразивов на керамической и частично на бакелитовой связках	Можно применять серу череновую и серный цвет
Стеарин технический (ГОСТ 6484—64)	Расплав, 80 °С	Для абразивов на бакелитовой и керамической связках	Можно добавлять олеиновую кислоту (10—15 %)
Парафин (ГОСТ 784—63)	Расплав, 80 °С	То же	—
Бакелит жидкий (ГОСТ 4559)	Жидкое	Для абразивных инструментов на бакелитовой связке	—
Кубовый остаток (фракция СЖК) (ГОСТ 8622—57)	Расплав, 18 °С	Для абразивных инструментов на бакелитовой и вулканитовой связках	Применяется на ГПЗ-8
Коллоидно-графитовый препарат (ГОСТ 5245—60)	Суспензия, 18—20 °С	Для абразивных кругов на бакелитовой и керамической связках	Пропитываются инструменты до № 5
I-X; I-P; I-L	Раствор	Для абразивов на керамической связке	Разработан Северо-Западным политехническим институтом

вания уровня раствора при пропитке инструментов различной высоты и обеспечивает равномерную пропитку абразива по всему объему.

Следующий способ импрегнирования абразивных инструментов — свободное капиллярное поднятие. Суть его заключается в медленном погружении нагретых до температуры импрегнатора абразивных инструментов в расплав или раствор, который за счет сил межмолекулярного сцепления поднимается по порам-капиллярам абразива. Максимальное погружение допускается до 0,9 высоты круга, что обеспечивает беспрепятственный выход находящегося в порах воздуха. Проникая по порам абразива, импрегнатор выступает на верхнем (непогруженном) торце и процесс считается законченным.

Насыщение импрегнатором пор абразива одновременно во всех направлениях препятствует выходу имеющегося в порах воздуха. Установлено также, что высота подъема серы и качество пропитки (равномерность заполнения объема круга) не зависят от положения, в котором круги погружаются в импрегнатор, — торцем либо произвольно.

Для качественной пропитки абразивного инструмента размером больше возможной высоты подъема импрегнатора по порам его необходимо погружать в импрегнатор постепенно. Скорость погруже-

ния фактически является скоростью импрегнирования и определяет производительность процесса. Скорость капиллярного поднятия жидкости

$$v_{\text{ср}} = \frac{Q}{f}, \quad (2)$$

где Q — расход жидкости через капилляр; f — коэффициент трения.

Расход жидкости через капилляр

$$Q = \frac{t_n^3 \Delta p W}{12 \mu_i l_k}, \quad (3)$$

где t_n , W — параметры поры (длина и ширина); Δp — перепад давления на входе и выходе из капилляра, равный $p_1 - p_2 = d_g H_i$ (μ_i — коэффициент динамической вязкости импрегнатора; d_g — диаметр поры; $H_i = l_k$ — длина капилляра — высота подъема импрегнатора).

После некоторых преобразований получим уравнение скорости подъема серы по порам шлифовального круга при температуре расплава 135 °С:

$$\begin{aligned} v_{\text{ср}} &= K_{\text{зш}} \frac{Q}{f} = K_{\text{зш}}^2 \frac{l_n^2 d_g}{12 \mu_{\text{ср}}} = \\ &= K_{\text{зш}}^2 1700 l_n^2 \text{ см/с}, \end{aligned} \quad (4)$$

где $K_{\text{зш}}$ — зернистость шлифовального круга.

В общем случае для различных импрегнаторов

$$v_{\text{ср}} = K_{\text{зш}}^2 l_n^2 \text{ см/с}.$$

Установлен эффект влияния ультразвука на движение в капиллярах, повышающий его скорость в 40—50 раз. Возможности применения этого эффекта в технике довольно широки. На Горьковском автозаводе с помощью ультразвука пропитывают металлокерамические втулки амортизаторов автомобилей. Во Всесоюзном научно-исследовательском институте абразивов и шлифования (ВНИИАШ) проведены исследования пропитки графитом абразивов характеристики 24A25NM2K7 за счет свободного капиллярного поднятия, вакуумированием и посредством ультразвука. Установлено, что количество поглощенного образцами графита практически не зависит от способа пропитки и составляет 1,7 % массы образца. При пропитке посредством ультразвука время импрегнирования меньше в 3—4 раза по сравнению с другими способами.

Содержание серы в процентах от массы круга находится в пределах 24—32 %. Содержание серы в круге растет пропорционально уменьшению исходной твердости пропитываемых шлифовальных

кругов. Твердость шлифовальных кругов после импрегнирования серой возрастает на две—три степени.

Установлено, что по мере выдержки пропитанных кругов в обычных складских помещениях полученная после пропитки твердость постепенно уменьшается и через 1,5—2 мес. становится близкой к исходной. Снижение твердости имеет важное практическое значение. Оно объясняется тем, что при сравнительно быстром остывании серы в порах кругов в затвердевшей массе содержатся молекулы пластической серы, что отражается на ее свойствах. После выдержки абразивного инструмента кристаллы серы приобретают ромбическую форму (хрупкая сера). Установлен также оптимальный температурный режим импрегнатора и подогрева кругов. Известно, что при температуре 112—120 °С сера переходит в жидкое состояние, однако наибольшую жидкотекучесть она имеет при $T = 135\div 140$ °С. После 150 °С сера густеет и цвет ее становится бурым. Пропитываемые круги должны быть прогреты до 130—140 °С для расширения пор и обеспечения равновесия температур импрегнатора и круга. Абразивный инструмент на бакелитовой связке необходимо подогревать только до 110—120 °С во избежание разрушения связки. Если круг не прогрет, сера застывает в его порах и процесс капиллярного поднятия прекращается.

Следующий способ — пропитка абразивного инструмента в вакууме с последующим увеличением давления до атмосферного. Подогретый до температуры импрегнатора абразивный инструмент загружают в автоклав, в котором создается некоторое разрежение, и воздух, находящийся в порах абразива, выходит. В автоклав подают жидкий импрегнатор, после чего полость пропитки соединяется с атмосферой и дальнейшее насыщение пор абразива импрегнатором происходит под действием атмосферного давления.

Пропитка в вакууме несколько увеличивает содержание импрегнатора. Вращением горячих кругов до охлаждения достигалось снижение насыщенности импрегнатором парафином с 13—14 % до 9 %, при вращении со скоростью 2,5 м/с и до 3,5 % при вращении со скоростью 5,0 м/с.

На основании исследований предлагается следующая технология пропитки абразивных инструментов различными импрегнаторами.

Пропитка серой в вакууме. В расплав серы с температурой 140—150 °С, находящийся в вакуум-баке, погружают полностью абразив, нагретый до 160 °С, создается вакуум, затем вакуум-бак соединяют с атмосферой. Откачивают импрегнатор, абразив вынимают и охлаждают в перевернутом виде.

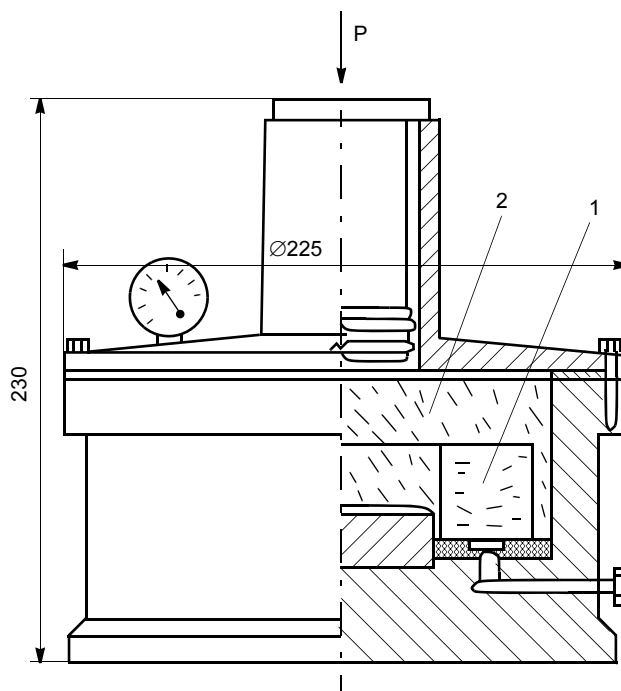
Пропитка парафином за счет свободного капиллярного поднятия. В расплав парафина при

57—60 °С погружают нагретый до 130 °С инструмент на 0,9 его высоты и выдерживают до появления парафина на верхнем торце, после чего образец вынимают и в перевернутом виде охлаждают на воздухе.

Способ импрегнирования под избыточным давлением. Он позволяет пропитывать различные материалы даже несмачивающей жидкостью, когда капиллярные силы сопротивляются проникновению жидкости в поры и даже выталкивают ее. Жидкость подается в поры под высоким гидростатическим давлением. Производили пропитку сырой древесины, абразивных брусков и металлокерамики гиподной смазкой, металлическими расплавами и другими наполнителями. При этом использовали контейнер высокого давления, которое поднимали до 0,5—1200 МПа. Время пропитки 3—4 с.

Высокое давление при пропитке не влияет на температуру пропитывающей жидкости, что существенно расширяет диапазон пропитываемых веществ, позволяет использовать высоковязкие жидкости и жидкости, не допускающие нагрева. При этом можно пропитывать пористый материал, уже пропитанный другой жидкостью без ее предварительного удаления. Таким образом, пропитка материалов под давлением — перспективный способ повышения их качественных показателей.

В лаборатории ВИИППа проведены исследования пропитки под давлением плотных шлифовальных



Пресс-форма для пропитки абразивных кругов под давлением

кругов на вулканитовой связке характеристик ПП 150 × 50 × 5 14А6СМ2-М2 ВП 430-500. Технологический процесс пропитки под давлением вулканитовых кругов заключается в следующем: прогретый шлифовальный круг помещается в специальную пресс-форму (см. рисунок), куда заливается расплав либо раствор импрегнатора. Температура круга 1 и импрегнатора 2 должна быть примерно одинаковой. После заливки поршнем пресс-формы создается определенное давление, величина которого зависит от характеристики круга и свойств импрегнатора. Выдержка под давлением производится до момента появления импрегнатора в отверстии для вывода его избытка. Появление импрегнатора свидетельствует о равномерной пропитке всего объема абразивного инструмента.

Наряду с улучшением качественных показателей импрегнированный абразивный инструмент приобретает, по крайней мере, два отрицательных свойства: увеличение остаточного дисбаланса и повышение плотности структуры.

Увеличение дисбаланса за счет импрегнирования начинает сказываться на шлифовальных кругах диаметром свыше 150 мм. Перед установкой на станки импрегнированные шлифовальные круги кроме обычных испытаний на разрыв должны быть подвергнуты тщательной статической балансировке. Содержание импрегнатора в круге зависит от его характеристики, свойств импрегнатора и может находиться в пределах от 2—3 % до 25—30 %. В зависимости от способов сушки кругов после импрегнирования и скорости остывания импрегнатора его содержание по высоте инструмента может быть различным.

Во ВНИППе проведены исследования распределения импрегнатора в круге по высоте при импрегнировании шлифовальных кругов (характеристики ПП 450 × 150 × 250 14А25НМЗБ) фракцией СЖК. Сравнивали удельный вес участков пропитанных и непропитанных кругов, которые вырезали из целого круга. Удельный вес определяли по вытесненному бруском объему воды, при этом учитывали водопоглощаемость образцов.

Процентное содержание импрегнатора определяли из соотношения

$$X = \frac{Y_{\text{п}} - Y_{\text{нп}}}{Y_{\text{п}}} 100 \%, \quad (5)$$

где $Y_{\text{п}}$, $Y_{\text{нп}}$ — удельный вес пропитанного и непропитанного образцов.

Установлено, что содержание фракции СЖК в кругах характеристики 14А25НМЗБ составляет 5—15 %.

Контроль качества импрегнирования абразивных инструментов является слабым звеном этого процесса и при импрегнировании способом погружения, а также с использованием вакуумирования невозможно даже визуальное наблюдение за процессом. При пропитке абразивов способом свободного капиллярного поднятия ведут визуальное наблюдение за качеством импрегнирования, однако появление импрегнатора на верхних (не погруженных) участках инструмента еще не свидетельствует о равномерном заполнении всего его объема. Обычно контроль качества пропитки производится путем разрушения одного—двух образцов от пропитываемой партии. Методы неразрушающего контроля импрегнированных абразивных инструментов пока не разработаны.

Импрегнированный абразивный инструмент позволяет осуществлять безожоговое шлифование на поперечных подачах, в 3—4 раза больших, чем те, которые допускают обычные круги. Его износостойкость повышается в среднем в 2—3 раза, что улучшает качество обрабатываемой поверхности, обеспечивает точность и стабильность геометрических параметров изделий.

Пропитка стандартного абразивного инструмента различными импрегнаторами является перспективным методом повышения их эксплуатационных характеристик вследствие простоты и высокой эффективности. Импрегнированный абразивный инструмент находит широкое применение в отечественной и зарубежной металлообрабатывающей промышленности. Развитие процессов пропитки идет по пути разработки и исследования новых более эффективных импрегнаторов, содержащих поверхностно-активные вещества, совершенствования способов импрегнирования и создания нового оборудования для этих целей.

Применение импрегнированного абразивного инструмента в металлообработке положительно влияет на все показатели процесса шлифования: качество поверхности, точность геометрических параметров изделий, стойкость инструмента между правками, производительность. Затраты, связанные с дополнительной обработкой готового абразивного инструмента, незначительны и быстро окупаются.

Универсального импрегнатора для абразивных инструментов различных характеристик, используемых для шлифования различных материалов, практически не существует. Для каждого отдельного абразивного инструмента в соответствии с условиями обработки необходимо подбирать наиболее эффективный импрегнатор.

В. А. БОГДАНОВСКИЙ, инж., **В. М. ГАВВА**, инж., **Н. М. МАХЛИН**, инж.,
А. Д. ЧЕРЕДНИК, инж., **А. Е. КОРОТЫНСКИЙ**, канд. техн. наук,
А. Ф. МУЖИЧЕНКО, инж., **К. А. ВОРОБЬЕВ**, инж.
(ИЭС им. Е. О. Патона),
С. Ф. ТАРХОВ, инж., **В. А. ФЕДОТОВ**, канд. техн. наук
(ЗАО "Экоинвент", Москва)

Компьютеризированный малоамперный дуговой тренажер сварщика

В настоящее время обучение рабочих-сварщиков ручной и механизированной сварке ведется на реальном процессе и связано со значительным расходом металла, сварочных материалов и электроэнергии, а также сопряжено с выделением вредных сварочных аэрозолей. Кроме того, отсутствие средств оперативного контроля за действиями обучаемого с целью своевременной корректировки дает основание считать обучение на реальном сварочном процессе недостаточно эффективным.

Повысить качество и уровень подготовки квалифицированных сварщиков, интенсифицировать учебный процесс, активизировать познавательную деятельность учащихся, снизить расход сварочных материалов и электроэнергии позволяют специально разработанные тренажеры, которые моделируют производственный процесс и создают оптимальные условия для эффективного формирования профессиональных знаний, умений и навыков.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан современный компьютеризированный малоамперный тренажер сварщика МДТС, в котором имитация сварочного процесса, приближенного к реальным условиям сварки, осуществляется малоамперной дугой на пластине или имитируемом сварочном соединении (рис. 1).

Малоамперный тренажер предназначен для обучения, тренировки и тестового контроля психофизиологического состояния и квалификации сварщиков и используется для освоения следующих навыков по технике сварки: возбуждения дуги и поддержания определенной длины дугового промежутка; поддержания пространственного положения ручного инструмента по отношению к свариваемой поверхности и заданной погонной энергии сварочного процесса, а также отработки техники равномерного перемещения ручного инструмента с электродом относительно свариваемых поверхностей с заданной скоростью.

Тренажер обеспечивает моделирование процесса сварки с помощью малоамперной дуги, освоение приемов техники сварки стыковых и угловых соединений в различных пространственных положениях, ре-

гистрацию информации о правильности имитируемого сварочного процесса по длине дугового промежутка, углам наклона электрода, погонной энергии и скорости сварки.

По мере усвоения обучаемым психомоторных навыков по технике сварки пороговые значения основных контролируемых параметров имитируемого процесса сварки могут сужаться, повышая сложность учебного задания.

В процессе обучения на тренажере осуществляется оперативная обратная связь с обучаемым по результатам его учебных действий путем подачи речевой подсказки при выходе основных контролируемых параметров режима сварки за пределы заданных величин.

Применение компьютерной техники позволяет вводить исходные данные режима имитируемого сварочного процесса в диалоговом режиме (рис. 2), а также отображать на экране монитора компьютера текущие параметры имитируемого сварочного процесса (рис. 3). Программное обеспечение тренажера проводит статистическую обработку результатов тренажа и анализ по каждому контролируемому параметру режима сварки, а также оценивает качество выполнения имитируемого сварочного процесса за счет введения элементов экспертной системы.

Результаты работы тренажера документально регистрируются в виде табличной и графической информации на оптическом, магнитном и бумаж-



Рис. 1. Малоамперный дуговой тренажер сварщика МДТС

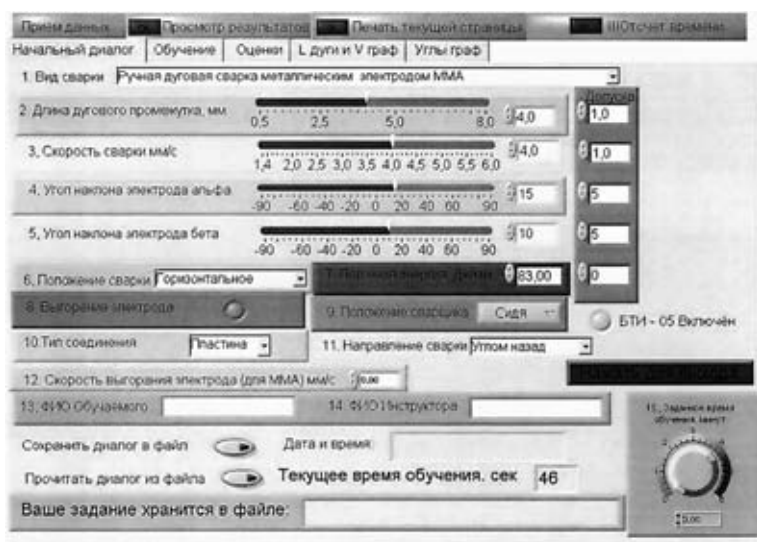


Рис. 2. Начальный диалог установки параметров режима сварки

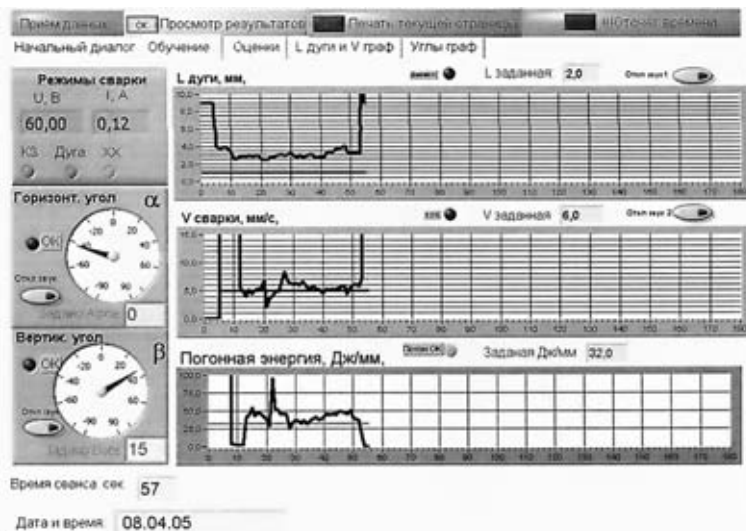


Рис. 3. Окно "Обучение"

Результаты обучения		Текущее время обучения		0	
№	Наименование	Задано	Выше, %	Норма, %	Ниже, %
1.	Длина дуги, мм	4,0	25,0	65,0	10,0
2	Положение сварки: 0-гор., 1-верт., 2-потоп.	0			
3	Угол наклона электрода, α	15	0,0	80,0	20,0
4	Угол наклона электрода, β	10	0,0	90,5	9,5
5	Скорость сварки, мм/с	4	12,0	80,0	8,0
6	Погонная энергия, Дж/мм	83	69,2	0,0	30,8
7	Направление сварки: 0-углом вперед, 1-назад	1			
10.	ФИО Обучаемого				
11.	ФИО Инструктора				
		Общая оценка		4	

Рис. 4. Окно "Табличные результаты обучения"

ном носителях, что позволяет осуществлять оперативный контроль за динамикой формирования навыков у обучаемых (рис. 4).

Специальная тестовая программа позволяет проводить контроль психофизиологического состояния и квалификации сварщиков, особенно после длительных перерывов и простоев в работе, обусловленных характером трудовой деятельности. Для этих целей малоамперный тренажер снабжен специальной программой тестирования.

Питание тренажера осуществляется от сети переменного тока напряжением 220 В ± 10 %, частотой 50 ± 1 Гц.

Техническая характеристика тренажера

Потребляемая мощность В · А	≤ 750,0
Время готовности к работе после включения тренажера, мин	≤ 1
Длина дугового промежутка в нормальном режиме обучения, мм	1—6
Напряжение дуги, В	25—40
Сварочный ток, А	≤ 7,5
Диаметр электрода, мм	2—3
Угол наклона электрода относительно горизонтальной свариваемой поверхности α, градус	0 ± 45
Угол наклона электрода относительно вертикальной плоскости β, градус	0 ± 45
Мощность сварочной дуги, Вт	200
Скорость сварки, мм/с	2—12
Скорость имитации плавления электрода, мм/с	3,5—7,5
Время нахождения в режиме "Сварка", с	180, 240, 360
Род сварочного тока	Постоянный, обратная полярность

В состав тренажера входят технологический интерфейс, являющийся аппаратным устройством для приема и обработки сигналов, поступающих с датчиков напряжения, тока, углов положения инструмента, а

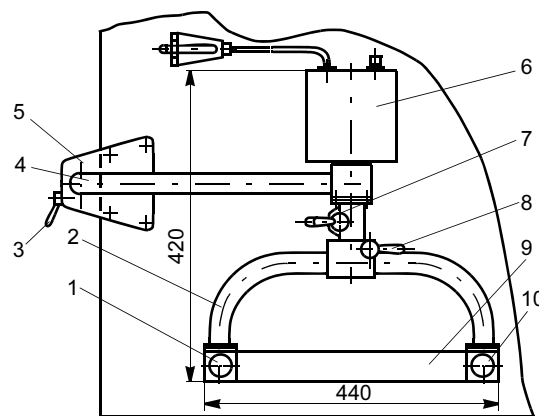


Рис. 5. Манипулятор-позиционер

также манипулятор-позиционер сварного образца и ручные инструменты сварщика. Тренажер снабжен маской сварщика с наголовным креплением и автоматическим светофильтром, который позволяет сварщику выполнять все стадии сварочных работ, не поднимая маску. Регулировка степени затемнения в зависимости от сварочного тока производится регулятором, расположенным на наружной поверхности маски.

Тренажер по требованию заказчика комплектуется персональным компьютером типа IBM PC с системным блоком, монитором, клавиатурой, мышью, принтером, головными телефонами, посредством которых производится речевая подсказка об ошибках по каждому контролируемому параметру режима сварки.

Манипулятор-позиционер предназначен для крепления плоского и углового образцов сварного соединения и его позиционирования в различные пространственные положения, обеспечивает подвод к образцу сварочного тока и съем обратных сигналов, пропорциональных сварочному току на токоподводах манипулятора.

Манипулятор (рис. 5) представляет изогнутый трубчатый кронштейн 4, установленный с возможностью перемещения по двум координатам в корпусе 5, несущий на себе поворотную деку 2 и блок датчиков 6. На концах С-образной трубчатой конструкции установлены медные токоподводы 10, снабженные прижимами 1 для закрепления сварного образца 9. В центральной части дека имеет шарнирный узел крепления к кронштейну, который позволяет занимать различные пространственные положения. Фиксирование необходимого положения дека обеспечивают два винтовых клиновых прижима 7 и 8. Внутри дека расположены кабели, соединяющие токоподводы с блоком датчиков, к которому от источника питания подводится сварочный ток.

Корпус манипулятора представляет трубку, закрепляемую на столешнице учебного стола, винтовой клиновой прижим 3 фиксирует положение кронштейна. Тренажер снабжен ручными инструментами сварщика четырех видов. Каждый инструмент состоит из рабочей сварочной головки, к которой присоединяется универсальный адаптер с датчиком углового положения инструмента сварщика.

Инструмент для ручной дуговой сварки имитирует плавление металлического электрода с покрытием путем его перемещения "от дуги" с заданной скоростью, соответствующей реальной скорости плавления электрода. Инструмент конструктивно выполнен в виде рукоятки, на которой смонтирован электромеханический привод перемещения электрода для имитации плавления, и обеспечивает два режима имитации плавления электрода при ручной дуговой сварке: без имитации и с заданной имитацией плавления электрода.

Инструменты сварщика для сварки в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродами выполнены на базе сварочных горелок общепромышленного применения, подвергнутых доработке. Горелки конструктивно модернизированы, вместо штатного токового наконечника установлены цанги для крепления вольфрамового электрода диаметром 2,0 и 3,0 мм, который выполняет роль электрода без имитации плавления. Штепсельный разъем с кнопкой "Пуск" служит для подключения к технологическому интерфейсу.

По аналогии инструмента для сварки в защитных газах выполнен инструмент сварщика для ручной дуговой сварки на базе держателя общепромышленного применения.

Учебная программа тренажера включает теоретические сведения по основам ручной дуговой сварки и пакет практических занятий. Каждое занятие предусматривает определенную последовательность действий по достижению заданной цели и критерии оценки работы учащихся. Программа обучения предполагает последовательное усложнение заданий и сужение пороговых значений контролируемых параметров сварочного процесса.

Программа обучения на малоамперном тренажере сварщика МДТС является составной частью ПО функционирования тренажера и предусматривает три раздела по освоению техники ручной дуговой сварки покрытыми электродами, аргонодуговой сварки неплавящимся электродом и механизированной сварки в защитных газах.

В качестве учебного пособия к программе обучения на тренажере прилагаются:

— библиотека основных типов конструктивных элементов швов сварных соединений ручной дуговой сварки, сварки в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродами (ГОСТ 5264—80 и 14771—76);

— библиотека основных дефектов сварных соединений, выполненных ручной дуговой сваркой, сваркой в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродами (ГОСТ 30242—97).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лысков Ф. Д. Педагогические основы создания и применения тренажеров. М.: Высшая школа, 1979. 20 с.
2. Бичаев Б. П., Зеленин В. М., Новик Л. И. Морские тренажеры. Л.: Судостроение, 1986. 288 с.
3. Васильев В. В., Даниляк С. Н. Организация сварочных тренажеров // Электронное моделирование. 1984. № 5. С. 69—72.
4. Использование вычислительной техники при создании тренажеров, сигнализирующих и контролирующих устройств: Методические указания. М.: Высшая школа, 1976. 38 с.
5. Шукшунев В. Е., Бакулов Ю. А., Григоренко В. Н. Тренажерные системы. М.: Машиностроение, 1981. 256 с.
6. Фоминых В. П. Методика практического обучения сварщиков ручной дуговой сварке. М.: Высшая школа, 1979. 159 с.
7. Шебеко Л. П. Производственное обучение электрогазосварщиков. М.: Высшая школа, 1979. 133 с.

А. П. МОРГУНОВ, д-р техн. наук, А. И. БЛЕСМАН, канд. техн. наук, В. С. КАЛЕКИН, д-р техн. наук,
А. М. ЛАСИЦА, инж., В. Г. ЧУРАНКИН, аспирант
Омский государственный технический университет

Технологическое обеспечение эффективности и надежности работы машин и агрегатов компрессорной техники

Повышение ресурса работы машин, увеличение срока службы быстроизнашивающихся деталей и узлов в большинстве случаев связаны с применением новых материалов и совершенствованием технологических способов их обработки.

Одним из эффективных методов поверхностной обработки деталей путем нанесения покрытий является плазменное напыление, которое по своим возможностям превосходит все известные методы и позволяет создавать покрытия практически из всех элементов периодической системы Д. И. Менделеева [1].

Из большого разнообразия методов плазменного напыления следует выделить ионную имплантацию, обеспечивающую улучшение многих эксплуатационных характеристик машин и агрегатов насосной, вакуумной и компрессорной техники. При имплантации в качестве первичных частиц могут выступать положительные и отрицательные ионы, нейтральные атомы, возможна имплантация молекулярных соединений. Ионная имплантация может быть выбрана одним из технологических методов финишной обработки, способствующих снижению шероховатости поверхности, улучшению триботехнических характеристик, повышению износоустойчивости, коррозионной стойкости элементов и деталей [2–4].

В связи с тем, что имплантация представляет неравновесный термодинамический процесс, то с ее помощью можно создавать сплавы и соединения, которые принципиально невозможно получить традиционными методами, и достигать концентрации внедренной примеси, превышающей предел ее растворимости в исходном веществе [4–6].

На установке ННВ-6.6-И1 с вакуумно-дуговым источником частотно-импульсного действия "Диан" в ОмГТУ провели серию экспериментов для выявления режимов имплантации, позволяющих получать наиболее благоприятное сочетание эксплуатационных характеристик поверхности деталей.

В корпусе вакуумной камеры установки, соединенной фланцами с ионным источником, снабженной предварительной и высоковакуумной система-

ми откачки воздуха, на рабочем столе размещается изделие, подвергаемое обработке высоким ускоряющим напряжением. Конструкция стола позволяет обеспечивать вращение изделий вокруг как своей оси, так и оси стола. Дуговой разряд с высоким содержанием ионов металла катода генерируется в зазоре между поджигающим электродом и катодом. В состав цепи, питающей дуговой разряд, входят интегратор и счетчик импульсов. Для подавления вторичных электронов ионный источник снабжен антидинатронной сеткой, выполняющей одновременно функции электростатической линзы. Можно фокусировать ионный пучок изменением радиуса ее кривизны.

Ресурс и работоспособность узлов и деталей машин и агрегатов компрессорной техники зависят от напряжений, возникающих в материале при обработке, твердости поверхностного слоя, микрорельефа поверхности и ее адгезионных свойств.

Влияние ионной имплантации на состояние микрорельефа поверхности высоколегированных сталей исследовали методом атомной силовой микроскопии с помощью зондового микроскопа Solver Pro. В результате были получены фотографии, цветопольные изображения поверхности, поперечные и продольные профилограммы, рассчитаны параметры шероховатости. Для увеличения степени достоверности полученных результатов исследовали две партии образцов с разной исходной шероховатостью. Проведен анализ поверхностей исходных образцов и образцов, имплантированных ионами молибдена, иттрия, скандия, гадолиния, и образца с комплексной обработкой последовательно ионами молибдена и иттрия.

Для имплантированных образцов улучшение микрорельефа связано с преимущественным распылением микропиков и выражается в уменьшении параметров шероховатости Ra , Rz и увеличении радиуса кривизны микровыступов.

На рис. 1 приведена неимплантированная поверхность образца из стали 38Х2МЮА (закалка от 940 °С в масло, отпуск при 600 °С) после обработки шлифованием. Параметры шероховатости: $Rz = 482,407$ нм,

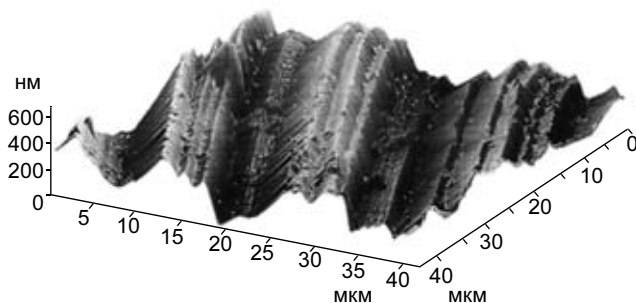


Рис. 1. Поверхность образца до имплантации

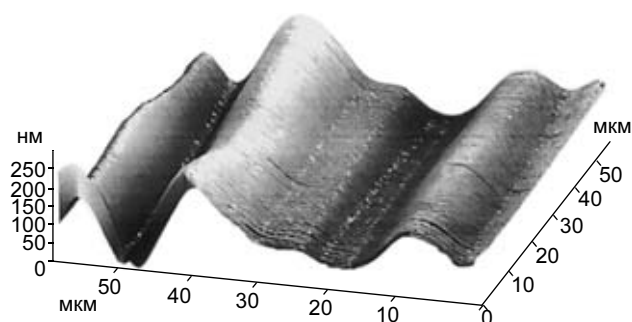


Рис. 3. Поверхность образца после имплантации молибденом и иттрием

$Ra = 149,557$ нм. Поверхность характеризуется значительным разбросом пиков по высоте и сложным субмикрорельефом.

Имплантация ионами молибдена улучшила микрорельеф поверхности. На рис. 2 приведена поверхность образца после обработки. Отмечено трехкратное уменьшение высоты микропиков ($Rz = 142,541$ нм, $Ra = 50,083$ нм). Положительное влияние имплантации сказалось и на субмикрорельефе поверхности. Обработка поверхности образца ионами иттрия, скандия и гадолиния привела к аналогичным результатам. Воздействие ионов гадолиния на микрорельеф имеет более яркое выражение, что, по-видимому, связано с более высоким значением атомной массы данного элемента и большим значением коэффициента распыления.

Последовательная имплантация ионами молибдена, а затем ионами иттрия улучшила микрорельеф поверхности. Параметры шероховатости — $Rz = 133,137$ нм, $Ra = 44,542$ нм. В результате анализа поперечных и продольных профилограмм установили увеличение радиуса кривизны микровыступов и улучшение микрорельефа в целом (рис. 3).

Микрорельеф поверхности зависит от величины энергии имплантированных частиц. На рис. 4 приведена зависимость комплексного параметра шероховатости Δ образца из стали 12Х18Н10Т от энергии

имплантированных частиц. Имплантацию проводили ионами молибдена в непрерывном режиме.

Минимальное значение комплексного показателя шероховатости Δ соответствует энергии 70—80 кэВ. В этом случае глубина упрочненного слоя составляла порядка 4 мкм. Имплантация в непрерывном режиме приводила к значительному разогреву образца (до 350 °С). В свою очередь при проведении обработки поверхности в импульсном режиме нагрев образца не превышал 50 °С, что позволяло достигать энергий имплантированных частиц до 110 кэВ и глубины модифицированного слоя до 6 мкм. Изменение микрорельефа при этом не происходило.

Наблюдаемое изменение микрорельефа поверхности при превышении указанного энергетического диапазона связано с кратерообразованием. Наличие минимума комплексного показателя шероховатости имело место также при имплантации образцов из легированных сталей других марок. Таким образом, изменением режима и величины энергии обработки можно добиться благоприятного микрорельефа поверхности.

Ионная имплантация влияет на адгезионные свойства поверхности. Внедряемые атомы, находясь в узлах кристаллической решетки, разрушают либо модифицируют химические связи, что приводит к

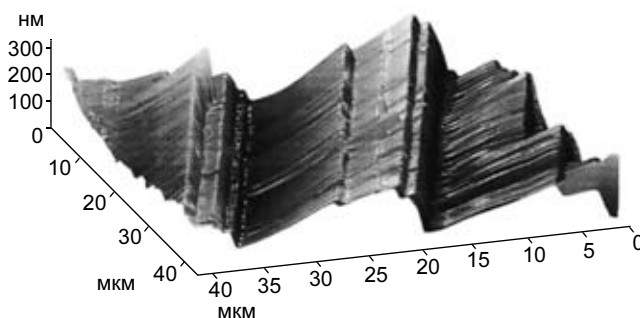
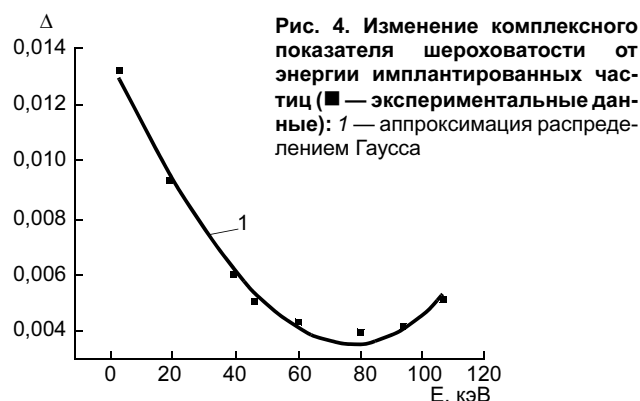


Рис. 2. Поверхность образца после имплантации молибденом



изменению дипольных моментов отдельных атомов. Как следствие, изменяется сила Ван-Дер-Ваальса, отвечающая за адгезионное взаимодействие. В экспериментах по измерению адгезии, выполненных на сканирующем зондовом микроскопе Solver Pro, устанавливали зависимость сил взаимодействия исследуемой поверхности с зондом от расстояния между ними. По соответствующей методике определяли толщину адсорбированного слоя влаги и силу взаимодействия. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Незначительное влияние имплантации иттрием на образец, предварительно имплантированный молибденом, объясняется формированием в поверхностных слоях упрочняющей молибденсодержащей фазы. Полученные данные хорошо согласуются между собой — увеличение максимальной силы адгезии соответствует увеличению толщины адсорбированного слоя.

Последнее обстоятельство имеет особенное значение для пар трения. При высокой силе адгезии поверхность металла покрывается защитной пленкой, что увеличивает износостойкость пары. Увеличение толщины адсорбированного слоя также уменьшает эффективную величину зазора в закрытых клапанах, поршневых и штоковых уплотнениях, плунжерных парах, что способствует снижению утечек и перетечек рабочих сред. Для запорных элементов самодействующих клапанов поршневых компрессоров, детандеров, пневмодвигателей и агрегатов [7, 8] это обстоятельство может оказывать как положительное влияние (обеспечение герметичности), так и отрицательное, приводящее к запаздыванию открытия и закрытия клапана за счет прилипания запорного элемента к поверхности седла или ограничителю подъема. Последнее положение нуждается в проверке на экспериментальных стендах для машин со смазкой и без смазки цилиндров.

Методом рентгеноструктурного анализа уширения дифракционных пиков исследовали влияние имплантации на размеры областей когерентного рассеяния и микроискажения кристаллической ре-

Таблица 1

Образец	Толщина адсорбированного слоя, нм	Максимальная сила адгезии, нН
Неимплантированный	0,37	52,21
Имплантированный ионами:		
Mo	3,25	60,53
Y	5,58	114,55
Mo + Y	4,37	76,49

Таблица 2

Образец	β , °		D , нм	$(\Delta I/I)10^{-2}$
	$2\theta = 44,671^\circ$	$2\theta = 98,940^\circ$		
Неимплантированный	0,201	0,413	47,5	0,128
Имплантированный ионами:				
Mo	0,237	0,566	40,3	0,196
Y	0,178	0,627	53,5	0,247
Mo + Y	0,265	0,594	35,9	0,197

Обозначения: θ — угол, соответствующий максимуму дифракционного пика; β — ширина дифракционного пика; D — размер области когерентного рассеяния; $\Delta I/I$ — относительные микроискажения.

шетки. Результаты приведены в табл. 2. Увеличение относительных микроискажений решетки в 1,5—2 раза вызывает аналогичное увеличение микронапряжений сжатия, что положительно влияет на износостойкость изделий. Отсутствие изменения микронапряжений после имплантации иттрия в образец, предварительно имплантированный молибденом, находится в хорошей корреляции с результатами, полученными при исследовании адгезионных свойств, и подтверждает предположение об образовании стабильной упрочняющей фазы, содержащей молибден.

Степень влияния ионной имплантации на твердость поверхностного слоя определяли измерением микротвердости по глубине образцов из стали 38Х2МЮА. Испытанию подвергали образцы, не имплантированные и прошедшие имплантацию ионами молибдена, иттрия и совместную обработку ионами обоих элементов. Измерения проводили на микротвердомере ПМТ-3М вдавливанием алмазной пирамиды при переменной нагрузке. Микротвердость определяли по шкале Виккерса. Глубину анализируемого слоя оценивали как $h = l/7$ (l — средняя длина диагонали, мкм). Результаты исследований приведены на рис. 5.

Физические свойства образцов сравнивали на глубине 6 мкм, которую принимали за глубину модифицированного слоя. Значительное увеличение микротвердости материала выявили после имплантации ионами молибдена. Была достигнута твердость, получаемая при азотировании поверхности. Низкие значения микротвердости после последовательной имплантации ионами молибдена и иттрия связаны с накоплением радиационных дефектов в кристаллической решетке.

На основании проведенных исследований установили влияние параметров ионной имплантации

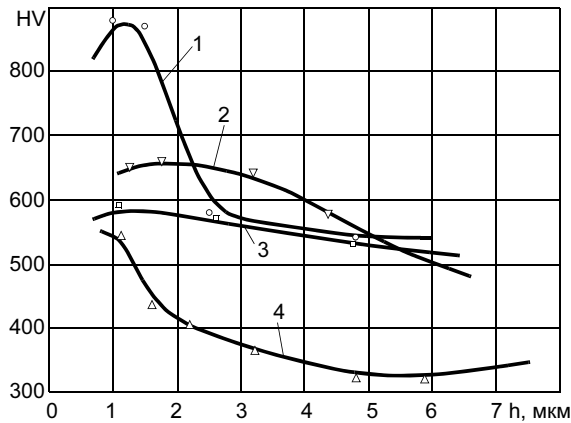


Рис. 5. Зависимость микротвердости образца от глубины внедрения индентора, имплантированного ионами Mo (1), Y (2) и Mo и Y (4) и неимплантированного (3)

(массы имплантируемых ионов, размера, энергии, режима (непрерывного или импульсного) имплантации и др.) на микрорельеф, микротвердость, износостойкость, адгезионные свойства высоколегированных сталей.

Определить зависимость изменения физико-механических свойств материалов от эксплуатационных показателей работы машин в настоящее время не представляется возможным. Надежные данные могут быть получены в результате экспериментальных исследований или стендовых испытаний конкретных машин.

Известно, что запорные элементы самодействующих клапанов поршневых машин (насосов, компрессоров, поршневых двигателей, детандеров и агрегатов, выполненных на их основе) в большей степени определяют ресурс, надежность и долговечность их работы. К ним предъявляют высокие требования по обеспечению ударной и усталостной прочности, износоустойчивости, герметичности в закрытом состоянии [9].

С целью исследования влияния ионной имплантации на эксплуатационные показатели поршневых машин с различными запорными элементами самодействующих клапанов разработаны два экспе-

риментальных стенда на базе холодильного вертикального двухрядного поршневого компрессора ФВ-6 с лепестковыми всасывающими и пятчковыми нагнетательными клапанами и однорядного пневмодвигателя с прямоточной системой движения воздуха с нормально открытыми самодействующими кольцевыми (тарельчатыми) клапанами [7]. Подготовлено несколько вариантов образцов запорных элементов клапанов из высоколегированных сталей, имплантированных ионами металлов и редкоземельных элементов. В задачи экспериментальных исследований входит проведение ресурсных испытаний со снятием внешних (производительности, мощности, давления и температуры воздуха на всасывании и нагнетании) и записью быстроменяющихся характеристик рабочих процессов (диаграмм движения запорных элементов клапанов, быстроменяющихся давления и температуры в цилиндрах компрессора и пневмодвигателя).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В. В. Плазменные покрытия. М.: Наука, 1977. 184 с.
2. Ионная имплантация / Под ред. Дж. К. Хирвонена: Пер. с англ. М.: Металлургия, 1985. 392 с.
3. Аброян А. И., Андронов А. Н., Титов А. И. Физические основы электронной и ионной технологии. М.: Высшая школа, 1984. 320 с.
4. Риссел Х., Руге И. Ионная имплантация: Пер. с нем. М.: Наука, 1983. 360 с.
5. Selective modifying of properties of constructional materials with the help of ion beam / A. P. Morgunov, K. K. Denisov, A. I. Blesman, A. M. Lasitsa // 19th National Conference on Heat Treatment with International Participation. 2002. P. 201—205.
6. Ласица А. М., Чуранкин В. Г., Моргунов А. П. Исследование качества боковых поверхностей зубьев шестерен, модифицированных ионами иттрия и молибдена // Вестник Курганского государственного университета. 2006. № 1. С. 59—60.
7. Поршневой пневматический двигатель с самодействующим впускным клапаном / В. С. Калекин, Е. Н. Бычковский, А. Д. Ваняшов, В. В. Калекин // Химическая техника. 2002. № 1. С. 27—29.
8. Пневмодвигатель — компрессорный агрегат с самодействующими клапанами / А. А. Горбунов, Р. А. Данилов, В. В. Калекин, В. С. Калекин // Вестник Сумского государственного университета. Сер. Технические науки. 2005. № 1 (173). С. 86—89.
9. Пластилин П. И. Поршневые компрессоры. Теория и расчет. 2 изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2000. Т. 1. 456 с.

И. Б. СТЕПАНОВ, канд. техн. наук

Научно-исследовательский институт ядерной физики (Томск)

Аксиально-симметричные фильтры жалюзийного типа для очистки плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции

Введение. Вакуумно-дуговой разряд (ВДР) с образованием катодного пятна как метод формирования плазменных потоков известен со второй половины девятнадцатого века [1]. За более чем вековую историю исследований физических процессов в вакуумных дугах были наглядно продемонстрированы такие неоспоримые преимущества ВДР, как возможность генерации плазмы при токах разряда до нескольких килоампер [2, 3], высокая 8—10 %-ная ионно-эмиссионная способность разряда, инициирование и устойчивое горение в отсутствии дополнительного напуска газа [4, 5], более чем 90 %-ная степень ионизации плазмы [3, 6—8], наличие высоких (до $2 \cdot 10^4$ м/с) направленных скоростей распространения плазменного потока [8, 9].

Впервые практическое использование ВДР было начато в Советском Союзе в семидесятых годах прошлого столетия с созданием оборудования для нанесения износостойких покрытий на металлорежущий инструмент [10, 11]. За прошедшие десятилетия ВДР зарекомендовал себя не только в качестве универсального инструмента в реализации технологий нанесения покрытий с различными функциональными свойствами, но и в качестве эффективного генератора плазмы в источниках ускоренных ионов [12—14].

В то же время с развитием оборудования и методов ионно-лучевой и плазменной обработки материалов с особой остротой проявился недостаток ВДР, связанный с наличием в плазменном потоке плазмы микрокапельной фракции (МКФ). Известно, что процесс генерации плазмы с образованием катодного пятна сопровождается включением в поток ионизованного материала нейтральной компоненты в виде атомов, молекул пара и крупных фрагментов продуктов эрозии катода — микрокапель [8, 15—17]. На долю МКФ может приходиться до нескольких десятков процентов от общей массы уносимого с катода материала [18]. Размер частиц зависит преимущественно от материала катода, тока и длительности разряда. Например, для катодов из Cd размер микрокапель достигает более 100 мкм, а для Mo — не превышает 20 мкм. Минимальные экспериментально зарегистрированные размеры частиц составляли менее 10 нм [19]. Максимум функции распределения частиц в пространстве прихо-

дится на угол 20—30° к поверхности катода, а скорость их распространения достигает $10—10^2$ м/с [5, 20]. В зависимости от режима генерации плазмы и материала катода МКФ может находиться в жидком или твердом агрегатном состоянии.

В большинстве случаев применения плазмы ВДР МКФ является отрицательным фактором. Покрытия, сформированные при наличии в плазменном потоке микрочастиц, характеризуются неоднородностью структуры, высокой пористостью и шероховатостью поверхности, низкой адгезионной прочностью [8, 21, 22]. МКФ ограничивает использование непрерывного ВДР в источниках ускоренных ионов вследствие загрязнения ионно-оптических систем, снижения электрической прочности диодной системы и нецелесообразности реализации режимов ионной имплантации [23, 24].

Один из наиболее известных подходов к устранению или снижению доли МКФ в плазменном потоке основан на реализации специальных условий генерации и осаждения плазмы. Например, заметное снижение микрочастиц в структуре сформированного покрытия наблюдалось в импульсном режиме генерации плазмы при длительности разряда до нескольких сотен микросекунд [25], в условиях быстрого перемещения катодного пятна [26], при увеличении площади поверхности [27] и снижении коэффициента эрозии катода, например, в случае формирования в поверхностном слое нитридных соединений [26, 27], в результате формирования вблизи поверхности обрабатываемой мишени отрицательного потенциала [27—29], при нагреве подложки [26] или в случае использования непрерывного ВДР с распределенным разрядом на горячем (более 10^3 К) катоде [30].

Альтернативный подход предусматривает очистку плазмы ВДР от МКФ с использованием специальных устройств. В качестве наиболее известных конструкций можно отметить механические сепараторы и оптически непрозрачные электромагнитные плазменные фильтры (ПФ). В первом случае очистка плазмы реализуется при соударении микрокапель с быстро перемещающимися лопастями. Взаимодействие МКФ с лопастями ПФ обеспечивается при выборе основных параметров системы в соответствии с выражением $\nu \geq \nu_K / N_s$ (ν — частота

вращения вала электродвигателя; v_k — скорость распространения микрокапельной фракции; N — число лопастей; s — ширина лопасти). С учетом разницы скорости разлета МКФ и направленного распространения заряженного компонента плазмы $v_{пл}$ отношение $v_k/v_{пл} \approx 10^{-4} \div 10^{-2}$. Следовательно, основная часть заряженного компонента плазмы может распространяться без взаимодействия с лопастями ПФ. Эффективность распространения плазмы в механическом ПФ приближенно можно оценить как $\eta \approx \eta^0 - v_k/v_{пл}$ (η^0 — эффективность распространения плазмы в неподвижных электродах).

В работе [31] исследовали механический сепаратор, представляющий собой систему из восьми лопастей шириной по 40 мм, размещенных на расстоянии 15 мм от диафрагмы диаметром 80 мм. Частота вращения вала электродвигателя достигала $12 \cdot 10^3$ об/мин. Коллектор диаметром 120 мм размещался на расстоянии 30 мм от лопастей ПФ. В качестве материала катода использовали Ti. Ток ВДР составлял 100 А. Измерения ионного тока из плазмы на коллектор показали, что эффективность прохождения плазменного потока в рассмотренной системе электродов составила около 82 %.

Вторую, более многочисленную группу ПФ, составляют устройства, основанные на транспортировке плазменного потока в скрещенных $E \times B$ полях с обеспечением оптической непрозрачности системы в направлении распространения плазменного потока [1, 32]. К таким устройствам, например, относятся криволинейные ПФ, в том числе выполненные в виде четверти тора [33]. В большинстве случаев практического применения эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока для таких систем составляет около 0,8 % тока дугового разряда [34, 35]. В отдельных экспериментальных разработках этот параметр составлял около 6,5 % [1]. Однако вследствие малой распространенности последних конструкций эти значения требуют дополнительной проверки. В работе [36] показано, что тороидальные ПФ позволяют снижать содержание МКФ от 15 до 150 раз. Наличие на выходе ПФ микрокапель связано с отражением частиц от стенок плазменного канала. В ряде работ для улучшения качества очистки плазмы стенки ПФ выполняли в виде неплотно намотанной спирали [37] или внутри тороидального канала располагали дополнительные конструктивные элементы [32].

Цель работы — анализ и обобщение результатов исследования характеристик альтернативного класса ПФ, а именно жалюзийного типа. Оптическая непрозрачность таких систем обеспечивается набором электродов, расположенных под углом к оси вакуумного дугового испарителя (ВДИ)¹. Подобные фильтры зарекомендовали себя в качестве

простых, компактных и эффективных устройств очистки плазмы для различных практических применений [12, 21]. Несмотря на появление в последние годы ряда публикаций, посвященных ПФ жалюзийного типа [38—42], недостаточно изученным оставался механизм распространения плазменного потока в межэлектродных промежутках ПФ при наличии магнитных и электрических полей. Дискуссии вызывала тема взаимодействия микрокапель с электродами фильтра.

Транспортировка заряженного компонента плазменного потока. Принцип работы ПФ жалюзийного типа приведен на рис. 1, а. Очистка плазмы реализуется в результате взаимодействия микрокапель с электродами ПФ, расположенными на пути распространения плазменного потока. В приближении катода бесконечно малых размеров это условие выполняется при выборе геометрических параметров электродов ПФ согласно выражению $\alpha \geq \arcsin(h/L)$ (α — угол поворота электродов относительно распространения плазменного потока, h — расстояние между электродами, L — длина электродов).

Влияние геометрических параметров электродов и их пространственного расположения на условия распространения плазменного потока первоначально было рассмотрено для варианта работы ПФ в "пассивном" режиме, т. е. в отсутствие внешних электрических и магнитных полей. В качестве материала катода в экспериментах использовали Ti. Зависимости, приведенные на рис. 2 (кривые 1—3), характеризуют эффективность прохождения заряженного компонента плазмы для однощелевого ПФ

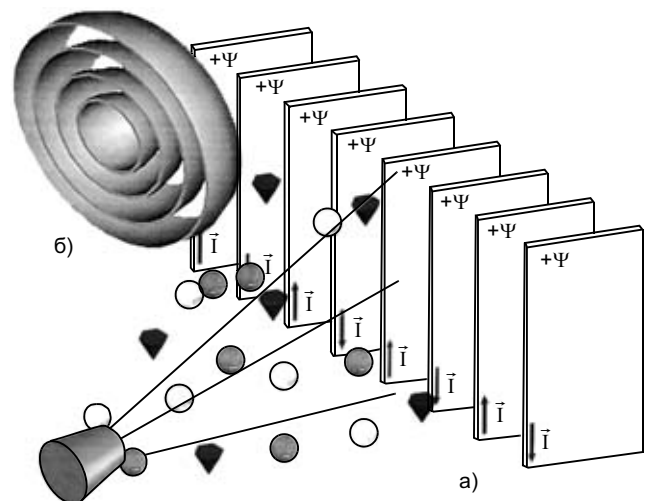


Рис. 1. Схема принципа работы ПФ с плоскопараллельными (а) и аксиально-симметричными (б) электродами

¹Патент 2108636, 2097868, 2107968 (РФ).

η , определяемую как отношение ионного тока из плазмы на выходе фильтра к ионному току на его входе.

Наблюдаемые потери ионов на стенках плазменного канала ($\eta < 1$) даже при $\alpha = 0$ можно объяснить расширением плазменного потока за счет наличия у частиц тепловых скоростей. При $\alpha > 0$ снижение η будет определяться преимущественно потерей ионов, траектории направленного движения которых пересекаются с электродами ПФ. При обеспечении оптической непрозрачности плазменного канала ($\alpha > 20^\circ$) прохождение ионов на выход фильтра ($\eta \neq 0$) также будет определяться наличием у частиц тепловых скоростей. В общем случае влияние геометрических параметров электродов и их расположения на условия прохождения плазменного потока определяется соотношением $\eta \approx h/(\alpha L)$. Эффективность транспортировки плазмы в "пассивном" режиме работы ПФ для плоскопараллельных электродов может быть определена как $\eta = \exp[-(\operatorname{tg} \alpha + v_{\text{из}}/v_{\text{пл}})L/h]$ ($v_{\text{из}}$ — ионно-звуковая скорость, равная $(kT_e/m)^{0,5}$; $v_{\text{пл}}$ — направленная скорость плазменного потока) [40]. Анализ выражения $\operatorname{grad} \eta$ показывает, что наибольшее влияние на изменение η оказывает увеличение угла наклона электродов. Экспериментально установлено, что в "пассивном" режиме работы даже для однощелевого ПФ на его выходе не удается регистрировать более 30 % ионного тока из плазмы. При очистке широких потоков плазмы и применении катодов больших линейных размеров ионный ток на выходе ПФ снижается более чем в $10\text{--}10^3$ раз.

Повысить эффективность прохождения заряженного компонента плазмы можно в случае формирования вблизи электродов ПФ отражающего

ионы потенциала. Условие отражения ионов от формируемого вблизи стенок ПФ потенциального барьера $Ze(\varphi_{\text{п}} - \varphi_{\text{эл}}) > E_{z0} \sin \alpha + kT_i$ (Z — зарядовое состояние ионов, e — заряд электрона, $\varphi_{\text{п}}$ — потенциал плазмы, $\varphi_{\text{эл}}$ — потенциал электродов, E_{z0} — средняя энергия направленного движения ионов, α — угол между поверхностью электрода и направлением распространения ионов, T_i — температура ионов) [24]. Формирование положительного падения напряжения вблизи стенок ПФ при распространении плазмы непрерывного ВДР реализуется в условиях "замагниченности" электронного компонента [43]. Магнитное поле и геометрические параметры системы могут быть выбраны согласно известному выражению $0,16(AT_i)^{0,5}/ZB > \Lambda \gg 0,0038 T_e^{0,5}/B$ (T_e — электронная температура, B — индукция магнитного поля, A — атомный вес материала рабочего вещества, Λ — геометрические параметры системы) [44].

На рис. 3 (кривая 1) приведены результаты измерений потенциала электродов ПФ. В отсутствие магнитного поля электроды фильтра, находящиеся под плавающим потенциалом, заряжены отрицательно вследствие высокой подвижности электронов. По мере роста магнитного поля, формируемого в результате пропускания по электродам тока от внешнего источника, степень "замагниченности" электронов возрастает, и при $B = 55 \cdot 10^{-4}$ Тл ток на электроды становится преимущественно ионным, а потенциал $\varphi_{\text{эл}}$ положительным. Распределение потенциала в межэлектродном промежутке ПФ, измеренное с использованием двойного зонда, приведено на рис. 3 (кривые 2—4). Из приведенных

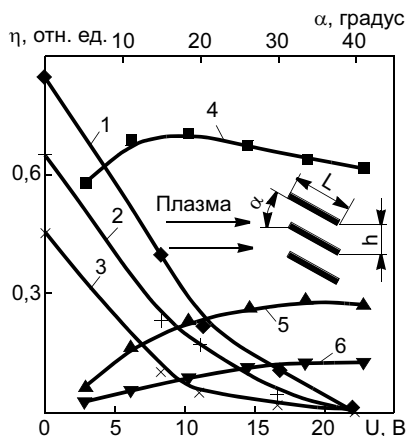


Рис. 2. Эффективность прохождения заряженного компонента плазменного потока η через ПФ в зависимости от угла наклона α (кривые 1—3) и потенциала электродов (кривые 4—6): 1 — $L = 45$ мм, $h = 10$ мм; 2 — 45 и 15 мм; 3 — 30 и 10 мм; 4 — $I = 300$ А, $\alpha = 15^\circ$; 5 — 300 А и 45° ; 6 — 0 и 30°

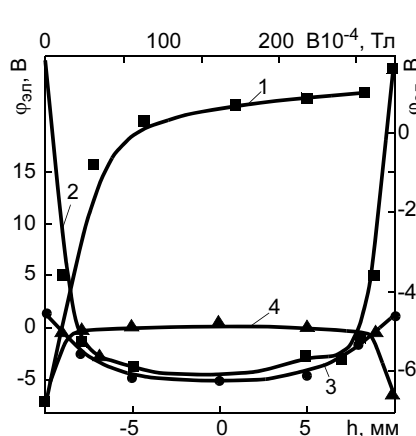


Рис. 3. Изменение потенциала электрода ПФ φ от магнитного поля (1) и распределение потенциала плазмы φ' по сечению межэлектродного промежутка (2—4): 2 — $U_{\text{эл}} = 25$ В, $B = 250 \cdot 10^{-4}$ Тл; 3 — "плавающий" потенциал электродов, $B = 250 \cdot 10^{-4}$ Тл; 4 — то же, $B = 0$

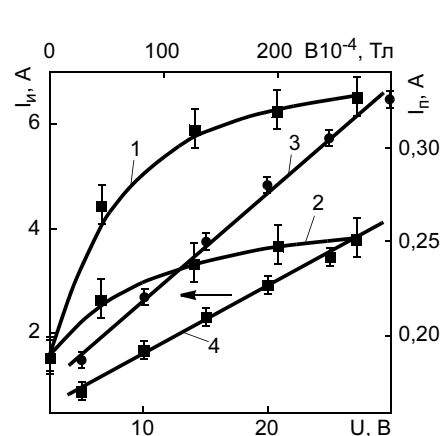


Рис. 4. Зависимость ионного тока из плазмы $I_{\text{п}}$ на выходе ПФ от магнитного поля (кривые 1, 2) и электронного тока в цепи источника $I_{\text{и}}$ смещения от потенциала электродов (кривые 3, 4): 1, 3 — согласованное включение полей ПФ и ВДИ; 2, 4 — встречное

данных видно, что при напряженности магнитного поля $2,5 \cdot 10^{-2}$ Тл потенциал $\varphi_{эл}$ достигает 1,5 В, а глубина его проникновения в плазму более $2 \cdot 10^{-3}$ м.

Данные о влиянии магнитного поля на ток ионов из плазмы для однощелевой модели ПФ приведены на рис. 4 (кривые 1, 2). Уже при малых магнитных полях наблюдается заметное повышение ионного тока на выходе фильтра. При согласованных магнитных полях ВДИ и ПФ на входе фильтра и в межэлектродном промежутке формируется продольное магнитное поле, что обеспечивает прохождение заряженного компонента плазменного потока с минимальными потерями. Для случая встречного включения магнитных полей на входе ПФ формируется радиальная составляющая, препятствующая входу электронного компонента плазменного потока в межэлектродный промежуток.

Результаты исследования закономерностей распространения плазменного потока в условиях формирования дополнительного положительного падения напряжения вблизи электродов ПФ приведены на рис. 2 (кривые 4—6). Из приведенных данных следует, что, как и в случае "пассивного" режима работы ПФ, эффективность прохождения плазмы уменьшается с ростом угла наклона электродов по отношению к оси системы. С увеличением α максимальное значение эффективности достигается в области больших потенциалов. Наблюдаемое уменьшение η с ростом потенциала смещения может быть обусловлено отражением ионов с малой энергией продольной составляющей вектора напряженности электрического поля. Дополнительный вклад в снижение η в области больших потенциалов вносит дрейф электронов поперек магнитного поля. Как следует из данных, приведенных на рис. 4 (кривые 3, 4), при повышении напряжения смещения ток в цепи источника питания увеличивается, что свидетельствует о нарушении условий магнитной изоляции электродов и замыкании электронов на стенки ПФ. Наличие в плазменном потоке ионов с энергией выше $E_{z0} \sin \alpha$ также будет влиять на снижение эффективности работы ПФ. В этом случае высокоэнергетичные ионы, преодолевая потенциальный барьер, будут осаждаться на электродах ПФ.

Расширить представление о механизме распространения заряженного компонента плазменного потока вблизи электродов ПФ позволяют результаты исследования зарядового состояния плазмы, выполненные с помощью плазменно-иммерсионного времяпролетного спектрометра² [45]. Приведенные в таблице данные о зарядовом состоянии ионов для Ti плазмы (ток разряда 110 А) свидетель-

Ток по электродам, А	Потенциал на электродах, В	Зарядовое состояние ионов, %			Среднее зарядовое состояние $\langle Z \rangle^*$
		Z1	Z2	Z3	
0	0	18,4	69,2	11,9	1,93
280	0	9,8	71,8	18,4	2,09
280	17	14,2	77,5	8,2	1,94
Непрерывный ВДР [3]		27,0	67,0	6,0	1,89
Импульсный ВДР [13]		6,0	82,0	12,0	2,05

* Содержание ионов Ti^{+4} и Ti^{+5} не превысило 1 % и в расчете средней зарядности не учитывали.

ствуют об увеличении в плазменном потоке ионов с зарядовым состоянием Ti^{+2} и Ti^{+3} в условиях формирования в межэлектродном промежутке магнитного поля. Наблюдаемый эффект обусловлен увеличением частоты соударений ионов с электронами в условиях формирования положительного падения напряжения вблизи стенок ПФ. Снижение доли трехзарядных ионов при увеличении потенциала электродов подтверждает предположение об отражении части ионов с низкой энергией на входе ПФ. Согласно данным работы [3], наименьшее значение приведенной средней энергии E_i/Z соответствует именно трехзарядным ионам.

Для очистки потоков плазмы с широким поперечным сечением предложены различные формы многоэлектродных ПФ¹. Проектирование таких систем требует учета линейных размеров катодов ВДИ, оптимизации конструкции с целью уменьшения числа электродов и снижения угла их поворота к направлению распространения плазменного по-

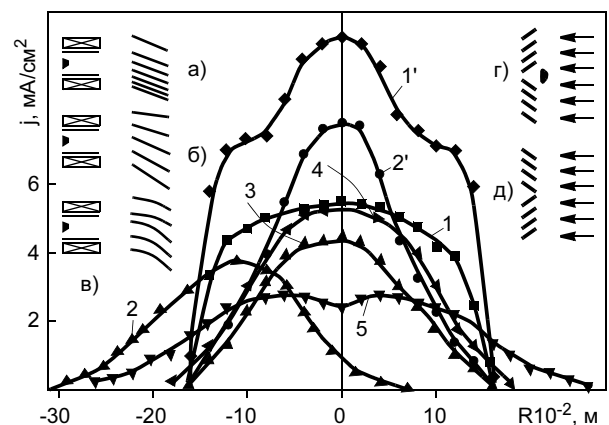


Рис. 5. Распределение плотности ионного тока из плазмы по сечению плазменного потока: 1, 1' — в отсутствие ПФ; 2 — плоско-параллельные электроды; 2', 3, 4 — аксиально-симметричная система сходящихся электродов (з); 5 — аксиально-симметричная система расходящихся электродов (д); 1', 2' — последовательное включение катушек ВДИ; 1—5 — встречное включение (построение электродных схем: а — изменяемое расстояние между электродами; б — индивидуальный угол поворота каждого электрода; в — электроды, выполненные в виде поверхностей второго порядка)

²Патент 2266587 (РФ).

тока. На рис. 5 (кривая 2) приведено распределение плотности ионного тока из плазмы на выходе ПФ, представляющего собой систему из шести плоскопараллельных электродов. На выходе ВДИ была установлена диафрагма диаметром 100 мм. Как следует из приведенных данных, в случае применения многоэлектродной системы максимум распределения плотности ионного тока сдвигается относительно оси ВДИ. В условиях данного эксперимента $\eta \approx 35\%$. С целью оптимизации конструкции ПФ предложены жалюзийные системы¹ с изменяемым расстоянием между электродами, индивидуальным углом поворота каждого электрода к направлению распространения плазменного потока, с электродами, выполненными в виде поверхности второго порядка. Схемы электродов приведены на рис. 5, а—в. Для последнего варианта конструкции ПФ максимальный угол подлета плазмы к электродам не превышает 32° .

Для формирования аксиально-симметричного распределения плотности ионного тока из плазмы на выходе ПФ была предложена коаксиальная система электродов¹ (см. рис. 1, б). На входе ПФ вблизи центрального электрода располагался защитный экран в виде сегмента полусферы. Распределение плотности ионного тока из плазмы на выходе ПФ приведено на рис. 5 (кривые 2'—4). Как видно из приведенных данных, коаксиальная конструкция позволяет сохранить направление распространения плазменного потока. Благодаря сходящейся геометрии электродов наблюдается фокусировка плазменного потока. Анализ распределения плотности ионного тока при наличии и в отсутствие ПФ позволяет сделать заключение о повышении η до 50 %. Более равномерное распределение плотности ионного тока получено для ПФ с расходящейся в направлении распространения плазменного потока формой электродов. Приведенные на рис. 5 (кривая 5) данные свидетельствуют о перераспределении ионного тока по сечению плазменного потока.

Энергетическая эффективность многоэлектродных систем обеспечивается протеканием тока по соседним электродам в противоположных направлениях. Эта специфическая особенность обуславливает необходимость формирования силовых линий магнитного поля, обеспечивающего распространение электронной компоненты плазменного потока вдоль электродов ПФ. Результаты моделирования силовых линий магнитного ВДИ и ПФ приведены на рис. 6. Форма магнитного поля формировалась при выборе тока и его направления по катушкам ВДИ, электродам фильтра и дополнительной магнитной катушке, расположенной на выходе ПФ. В результате оптимизации системы было сформировано магнитное поле, силовые линии которого

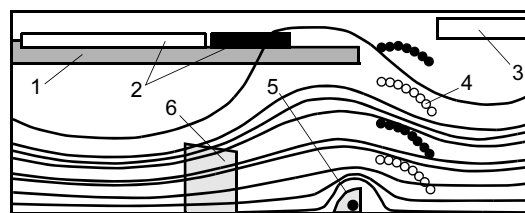


Рис. 6. Форма силовых линий магнитного поля вблизи электродов ПФ: 1 — анод; 2 — катушки ВДИ; 3 — дополнительная магнитная катушка; 4 — электроды ПФ; 5 — защитный электрод; 6 — катод

располагаются преимущественно вдоль электродов и не имеют на входе ПФ значительной радиальной составляющей. Это обеспечивает условия для снижения потерь электронного компонента на стенках ПФ и приводит к увеличению 30 % ионного тока на выходе фильтра (см. рис. 5, кривая 4). Оптимизация магнитной системы позволила не только повысить η , но и втрое снизить энергопотребление за счет снижения тока по электродам ПФ.

Очистка плазмы непрерывного ВДР от микрокапельной фракции. На рис. 7 приведена диаграмма, характеризующая изменение количества микрокапель, зарегистрированных на поверхности медного покрытия Π_{Cu} в зависимости от расстояния между ПФ и образцами. Подсчет МКФ при наличии и в отсутствие ПФ проводили по результатам сканирования покрытия с использованием 3D-профилометра как число частиц, зарегистрированных на единице площади в единицу времени, отнесенное к току ВДР. Приведенные данные свидетельствуют о возможности снижения в 10^2 — 10^4 раз содержания МКФ на поверхности формируемого покрытия. Резкое снижение числа зарегистрированных капель на расстоянии более 16 см свидетельствует о наличии геометрического фокуса сходящейся конфигурации электродов ПФ.

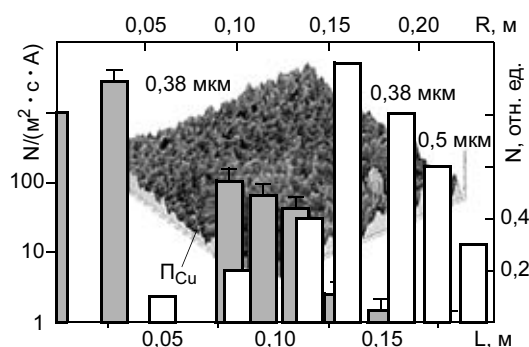


Рис. 7. Диаграмма изменения количества зарегистрированных микрокапель на поверхности медного покрытия в зависимости от расстояния до источника (■) и по сечению плазменного потока на расстоянии 20 см от источника (□)

Распределение МКФ по сечению плазменного потока приведено на рис. 7. Благодаря фокусирующей геометрии электродов микрочастицы, находящиеся в твердом агрегатном состоянии или образовавшиеся в результате разбрызгивания, могут распространяться преимущественно только в телесном угле, определяемом наклоном электродов ПФ к оси ВДИ. Механизм проникновения капель в результате их разбрызгивания косвенно подтверждается отсутствием на поверхности покрытия частиц размером более 5 мкм. Следовательно, расположение образцов на расстоянии, превышающем геометрический фокус ПФ, позволяет дополнительно сократить число макровключений на поверхности и в структуре наносимых покрытий.

Технологическое применение ПФ жалюзийного типа. На основании данных о закономерностях распространения и очистки плазмы непрерывного ВДР в устройствах жалюзийного типа было разработано несколько модификаций ПФ для оснащения ВДИ промышленных установок ионно-плазменного нанесения покрытий типа ННВ 6.6-И1 и др. Внешний вид ПФ для установки ННВ 6.6-И1 с инверторным источником питания приведен на рис. 8.

Высокий ресурс работы ПФ обеспечивается применением водоохлаждаемых электродов в виде соединенных между собой тонких трубок. Трубчатая конструкция электродов формирует ребристую структуру, что увеличивает на 15 % эффективность очистки плазмы от МКФ. Применение водоохлаждаемой конструкции приводит к возникновению высоких термомеханических напряжений между электродами фильтра и формирующимся на них покрытием, что способствует отслоению пленки и очистке электродов от продуктов эрозии катода ВДИ.

Оптимизация геометрии электродов и магнитной системы ПФ обеспечивает скорость роста покрытий на обрабатываемых образцах до 20 мкм/ч при токе разряда около 150 А. Несмотря на высокую эффективность работы ПФ, скорость роста покрытия при формировании пленок из Ti толщиной несколько микрон почти в 3 раза меньше скорости роста покрытия без него. Прежде всего это связано с отсечкой значительного массопереноса на образец материала катода в виде микрокапель и нейтрального пара. С учетом простоты конструкции и относительно невысокой стоимости оборудования оптимальным вариантом повышения скорости на-



Рис. 8. Внешний вид ПФ для установки ННВ6.6-И1

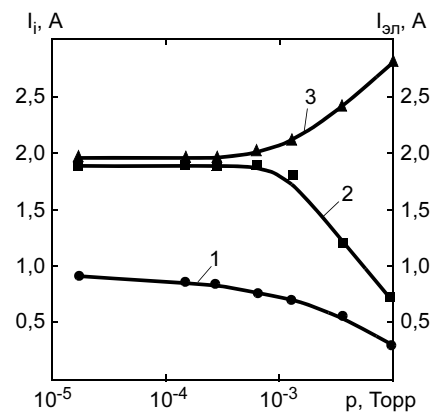


Рис. 9. Зависимость изменения ионного тока из плазмы на выходе ПФ (1, 2) и тока в цепи источника дополнительного смещения (3) от давления: 1, 2 — при наличии и в отсутствие ПФ соответственно

несения покрытий может быть увеличение числа применяемых генераторов плазмы [46].

Результаты исследования эффективности распространения плазменного потока в межэлектродных промежутках ПФ в реакционных газах приведены на рис. 9. Измерения ионного тока проведены для аксиально-симметричного ПФ с тремя электродами шириной 40 мм. Пропускаемый по электродам ток составил 1470 А, а амплитуда подаваемого от дополнительного источника питания положительного смещения — 18 В. Давление регулировали дозированной подачей в камеру азота.

Экспериментально установлено, что при давлении менее 10⁻³ Торр не происходит заметного ухудшения эффективности распространения ионного компонента плазменного потока. При повышении давления частота соударений электронов с атомами газа возрастает. В соответствии с известным выражением $\omega_e \tau_e \geq 1$ (ω_e — циклотронная частота электронов, τ_e — среднее время между столкновениями) [44] это приводит к ухудшению условий "замагниченности" электронов и дополнительным потерям ионов на стенках ПФ. Об этом свидетельствует более выраженный спад ионного тока. Нарушение условий "замагниченности" электронов подтверждается увеличением электронного тока в цепи источника смещения (см. рис. 9, кривая 3).

Способность ПФ работать в среде реакционных газов была апробирована при реализации режимов нанесения покрытий на основе TiN, CrN, TiAlN, TiSiB, TiSiN и др. Исследования свойств покрытий, сформированных с применением ПФ, показали улучшение основных эксплуатационных свойств покрытий [22]. Диаграмма изменения свойств ряда покрытий, сформированных при наличии и в отсутствие ПФ, приведена на рис. 10.

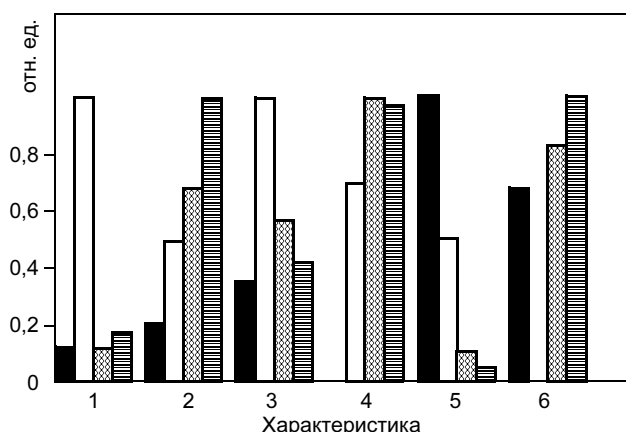


Рис. 10. Диаграмма изменения свойств TiN- и TiAlN-покрытий, сформированных на поверхности стали Р6М5 в отсутствие и при наличии ПФ: 1 — шероховатость поверхности; 2 — твердость; 3 — коэффициент трения; 4 — адгезионная прочность; 5 — износ при удалении продуктов истирания; 6 — износ в присутствии продуктов истирания (■ — сталь Р6М5; ▨ — TiN без ПФ; ▩ — TiN с ПФ; ▤ — TiAlN с ПФ)

Простота и компактность ПФ жалюзийного типа послужили основой для создания устройства очистки плазмы от МКФ для сильноточного источника ускоренных ионов и плазмы на основе непрерывного ВДР "Радуга-5"³ [12, 24]. Конструктивные элементы данного ПФ находятся под ускоряющим потенциалом до 40 кВ. Наряду с очисткой плазмы от МКФ электроды ПФ выполняют функцию формирования эмиссионной плазменной границы. Применение ПФ в диодной системе источника позволяет формировать пучки ионов с током до 2,5 А, энергией ионов до 120 кэВ с площадью поперечного сечения пучка до 0,13 м². В настоящее время это единственный ПФ, применяемый в широкоапертурных сильноточных источниках ионов проводящих материалов. Сочетание импульсно-периодического формирования пучка и непрерывной генерации плазмы позволяет применять источник "Радуга-5" для очистки поверхности, высококонцентрационной [47] и высокоинтенсивной [48] ионной имплантации, формирования широких переходных слоев между основой и покрытием, нанесения бездефектных адгезионно-прочных и плотных покрытий в режиме интенсивного ионного перемешивания [49]. В частности, с применением источника впервые продемонстрирована возможность формирования мелкодисперсных интерметаллидных структур систем Ti → Ni, Al → Ni, Al → Fe, Al → Ti с высокими эксплуатационными свойствами и глубиной легированных слоев в несколько микрометров [48].

³Патент 2113538 (РФ).

ВЫВОДЫ

1. Применение многоэлектродного аксиально-симметричного ПФ позволяет снизить количество дефектов на поверхности и в структуре наносимых покрытий до 10^2 — 10^4 раз. Дополнительного снижения МКФ можно добиться при размещении образцов на расстоянии, превышающем геометрический фокус системы электродов.

2. Эффективность распространения заряженного компонента плазменного потока на выход ПФ определяется геометрическими параметрами электродов, их расположением относительно направления распространения плазменного потока, величиной формируемого вблизи электродов положительного потенциала и формой силовых линий магнитного поля.

3. Присущие жалюзийным системам простота конструкции, компактность, возможность сохранения направления распространения плазменного потока послужили основой для создания ПФ, адаптированных для реализации широкого круга технологических режимов ионно-лучевой и плазменной обработки материалов, применительно к промышленным установкам типа ННВ6.6-И1 и источникам ускоренных ионов и плазмы на основе непрерывного ВДР типа "Радуга".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Boxman R. L., Zhitomirsky V. N. Vacuum arc deposition devices // Rev. Sci. Instrum. 2006. Vol. 77. P. 1—15.
- Любимов Г. А., Раховский В. И. Катодное пятно вакуумной дуги // УФН. 1978. Т. 125. В. 4. С. 665—706.
- Луцев В. М., Падалко В. Г., Хороших В. М. Исследование некоторых характеристик плазмы вакуумной металлической дуги // ЖТФ. 1977. Т. 7. С. 1486—1495.
- Kimblin C. W. Erosion and ionization in the cathode spot regions of vacuum arcs // J. Appl. Phys. 1973. Vol. 44. N 7. P. 3074—3081.
- Daalder J. F. Components of cathode erosion in vacuum arcs // J. Phys. D.: Appl. Phys. 1976. Vol. 9. P. 2379—2395.
- Плютто А. А., Рыжков В. Н., Капин А. Т. Высокоскоростные потоки плазмы вакуумных дуг // ЖЭТФ. 1964. Т. 47. № 2. С. 494—507.
- Луцев В. М., Падалко В. Г., Хороших В. М. Применение однопольного масс-спектрометра для исследования ионного компонента плазменного потока, генерируемого вакуумной дугой // ПТЭ. 1976. № 5. С. 189—190.
- Vacuum Arc Science and Technology / Edited by R. L. Boxman, P. J. Martin, D. M. Sanders. Noyes, Park Ridge, NJ. 1995. Chap. 3. P. 77—281.
- Райзер Ю. П. Физика газового разряда. М.: Наука, 1987. 529 с.
- Блинов И. Г., Дороднов А. М., Минайцев В. Е. Вакуумные сильноточные плазменные устройства и их применение в технологическом оборудовании микроэлектроники / Обзор по электронной технике. Сер. Микроэлектроника. М.: ЦНИИ Электроника, 1974.
- Абрамов И. С., Быстров Ю. А., Вильдгрубе В. Г. Плазменные ускорители и их применение в технологии / Обзор по

- электронной технике. Сер. Электровакуумные и газоразрядные приборы. М.: ЦНИИ Электроника, 1986.
12. *Vacuum arc ion and plasma source Raduga 5 for materials treatment* / A. I. Ryabchikov, I. B. Stepanov, S. V. Dektjarev, O. V. Sergeev // *Rev. Sci. Instrum.* 1998. Vol. 69. P. 810.
 13. *Brown I. G.* The Physics and Technology of ion Sources. New York: Wiley, 1989. 444 p.
 14. *Brown I. G., Oks E. M.* Vacuum Arc Ion Sources — A Brief Historical Review // *IEEE. Trans. Plasma Sci.* 1997. Vol. 25. P. 1222—1228.
 15. *Удрис Я. Я.* О разрушении материалов катодным пятном дуги // *Радиотехника и электроника.* 1963. Т. 8. № 6. С. 1057—1065.
 16. *Раховский В. И., Ягудаев А. М.* К вопросу о механизме разрушения электродов в импульсном разряде в вакууме // *ЖТФ.* 1969. Т. 39. С. 317—320.
 17. *Клярфелд Б. Н., Неретина Н. А., Дружинина Н. Н.* Разрушение металлов катодным пятном дуги в вакууме // *ЖТФ.* 1969. Т. 39. С. 1061—1065.
 18. *Аксенов И. И., Хороших В. М.* Потоки частиц и массоперенос в вакуумной дуге (обзор). М.: ЦНИИ Атоминформ, 1984. 57 с.
 19. *Erosion products from the cathode spot region of a copper vacuum arc* / D. T. Tuma, C. I. Chen, D. K. Davies et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1977. Vol. 10. N 3. P. 3821—3831.
 20. *Utsumi T., English J. H.* Study of electrode products emitted by vacuum arcs in form of molten metal particles // *J. Appl. Phys.* 1975. Vol. 46. N 1. P. 126—131.
 21. *Recent advances in surface processing with filtered DC vacuum-arc plasma* / A. I. Ryabchikov, I. A. Ryabchikov, D. O. Sivin, I. B. Stepanov // *Vacuum.* 2005. Vol. 78. P. 445—449.
 22. *Boxman R. L., Goldsmith S.* The interaction between plasma and macroparticles in a multicathode-spot vacuum arc // *J. Appl. Phys.* 1981. Vol. 52. P. 151—161.
 23. *Ryabchikov A. I., Ryabchikov I. A., Stepanov I. B.* Development of filtered DC metal plasma ion implantation and coating deposition methods based on high-frequency short-pulsed bias voltage application // *Vacuum.* 2005. Vol. 78. P. 331—336.
 24. *Рябчиков А. И., Дегтярев С. В., Степанов И. Б.* Источники "Радуга" и методы импульсно-периодической ионно-лучевой и ионно-плазменной обработки материалов // *Известия вузов. Физика.* 1998. № 4. С. 193—207.
 25. *Месяц Г. А., Проскуровский Д. И.* Импульсный электрический разряд в вакууме. Новосибирск: Наука, 1984. 256 с.
 26. *Kourtev J., Pascova R., Weißmantel E.* A modified method for arc deposition of Ti-N thin films // *Vacuum.* 1997. Vol. 48. N 1. P. 7—12.
 27. *Tai C. N., Koh E. S., Akari K.* Macroparticles on TiN films prepared by the arc ion plating process // *Surf. Coat. Technol.* 1990. Vol. 43—44. P. 324—335.
 28. *Influence of substrate bias voltage on deposition behavior and micro-indentation hardness of Ti—Si—N coatings by a hybrid coating system of arc ion plating and sputtering techniques* / S. R. Choi, I.-W. Park, J. H. Park, K. H. Kim // *Surf. Coat. Technol.* 2004. Vol. 179. P. 89—94.
 29. *Interaction of the droplet fraction of a vacuum arc with the plasma of a gas discharge* / P. M. Schanin, N. N. Koval, A. V. Kozyrev et al. // *J. Tech. Phys.* 2000. Vol. 41. N 2. P. 177—184.
 30. *Диденко А. Н., Лигачев А. Е., Куракин И. Б.* Воздействие пучков заряженных частиц на поверхность металлов и сплавов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 187 с.
 31. *Степанов И. Б.* Разработка и исследование источника ионов и плазмы на основе непрерывного вакуумно-дугового разряда и систем очистки плазмы от микрокапельной фракции: Дис. ... канд. техн. наук. Томск, 1998. 186 с.
 32. *Karpov D. A.* Cathodic arc sources and macroparticle filtering // *Surf. Coat. Technol.* 1997. Vol. 96. P. 22—33.
 33. *Аксенов И. И., Падалко Г. П., Хороших В. М.* Формирование потоков металлической плазмы (обзор). М.: ЦНИИ Атоминформ, 1984. 83 с.
 34. *Characterization of filtered cathodic vacuum arc system* / X. Shi, B. K. Tay, D. I. Flynn et al. // *Surf. Coat. Technol.* 1997. Vol. 94—95. P. 195—2000.
 35. *Improvement of tribological properties of 9Cr18 bearing steel using metal and nitrogen plasma-immersion ion implantation* / Z. M. Zeng, T. Zhang, B. Y. Tang et al. // *Surf. Coat. Technol.* 1999. Vol. 115. P. 234—238.
 36. *Macroparticle distribution in a quarter-torus plasma duct of a filtered vacuum arc deposition system* / M. Keidar, I. I. Beilis, R. Aharonov et al. // *J. Phys. D: Appl. Phys.* 1997. N 30. P. 2972—2978.
 37. *Storer J., Galvin J. E., Brown I. G.* Transport of vacuum arc plasma through straight and curved magnetic ducts // *J. Appl. Phys.* 1989. Vol. 66. P. 3245—3250.
 38. *Ryabchikov A. I.* Repetitively pulsed vacuum arc ion and plasma sources and new methods of ion and ion-plasma treatment of materials // *Surf. Coat. Technol.* 1997. Vol. 96. P. 9—15.
 39. *Ryabchikov A. I., Stepanov I. B.* Investigations of forming metal-plasma flows filtered from microparticle fraction in vacuum-arc evaporators // *Rev. Sci. Instrum.* 1998. Vol. 69. P. 893—895.
 40. *Исследование возможности применения дуоплазмотрона с вакуумно-дуговым разрядом для создания пленок из порошковых материалов с низкой проводимостью* / И. С. Абрамов, В. А. Андреев, В. Т. Барченко, А. А. Лисенков // *Изв. вузов. Физика.* 1994. № 3. С. 121—131.
 41. *Ветров Н. З., Кузнецов В. Г., Лисенков А. А.* Очистка металлической плазмы вакуумно-дугового разряда от микрокапельной фракции // *Петербургский журнал электроники.* 2001. № 1. С. 54—59.
 42. *Bilek M. M., Anders A. A., Brown I. G.* Characterization of a Linear Venetian-Blind Macroparticle Filter for Cathodic Vacuum Arcs // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 1999. Vol. 27. P. 1197—1202.
 43. *Морозов А. И.* Фокусировка холодных квазинейтральных пучков в электромагнитных полях // *ДАН СССР.* 1965. Т. 163. Вып. 6. С. 1363—1367.
 44. *Морозов А. И., Соловьев Л. С.* Плазмооптика // *Вопросы теории плазмы.* М.: Атомиздат, 1974. Вып. 8. 247 с.
 45. *Investigation of Plasma Filter Influence on Ions Charge State of Dc Vacuum Arc Plasma* / A. A. Sinebryukhov, S. V. Dektjarev, A. I. Ryabchikov, I. B. Stepanov // *Ion Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* Tomsk: Publishing house of the IOA SB RAS, 2004. P. 16—19.
 46. *Степанов И. Б.* Оборудование для реализации комбинированных методов ионно-лучевой ионно-плазменной модификации материалов // *Proceedings of the 6th Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* Томск: Издательский дом "Курсив", 2002. С. 33—39.
 47. *Ryabchikov A. I., Nasyrov R. A.* Repetitively pulsed, high-concentration implantation // *Nucl. Instrum. Meth. Phys.* 1991. Vol. 61. P. 48—51.
 48. *Высокоинтенсивная ионная имплантация — метод формирования мелкодисперсных интерметаллидов в поверхностных слоях металлов* / Ю. П. Шаркеев, А. И. Рябчиков, Э. В. Козлов и др. // *Известия вузов. Сер. физическая.* 2004. № 9. С. 44—52.
 49. *Formation of Wear-Resistant TiN and (Ti_{1-x}, Al_x)N Coatings Using Dc Filtered Vacuum Arc Plasma* / Ryabchikov A. I., N. N. Koval, I. B. Stepanov et al. // *Proceedings of 7th International Conference on Ion Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows.* Tomsk: Publishing house of the IOA SB RAS. 2004. P. 404—408.

С. Н. КУЛИКОВ, канд. техн. наук, П. Н. БАРАНОВ, канд. техн. наук
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Влияние погрешности квантования аналого-цифровыми преобразователями на точность алгоритмов вычисления параметров динамического дисбаланса при уравнивании роторов

Качество и надежность изделий приборо- и машиностроения во многом определяются точностью и качеством уравнивания вращающихся частей и деталей. Особенно высокие требования предъявляются к узлам и агрегатам, работающим на высоких оборотах или имеющих невысокую ремонтопригодность.

При анализе точности уравнивания на балансировочных станках следует учитывать не только точность работы систем измерения и коррекции дисбалансов, но и погрешность алгоритмов вычислительных операций, связанных в свою очередь с погрешностями представления данных аналого-цифровыми преобразователями (АЦП). Процесс уравнивания вращающихся тел на балансировочных комплексах в общем случае сводится к трем этапам.

На первом этапе измеряют параметры статического, моментного дисбалансов и осевой неуравновешенности. На втором используют различные алгоритмы для вычисления неуравновешенных масс, подлежащих коррекции, и соответствующих им углов в плоскостях исправления A и B . На третьем этапе осуществляют коррекцию дисбалансов.

В зависимости от типа ротора, системы датчиков, принципа построения балансировочного станка возможно использование различных подходов к определению дисбалансов. Например, при определении неуравновешенности ротора по вибрации опор можно сразу получить информацию о параметрах динамического дисбаланса, а при уравнивании роторов в бесконтактном подвесе определяют, как правило, отдельно параметры статического и моментного дисбалансов, которые устраняются независимо друг от друга, или путем вычисления параметров вектора динамического дисбаланса.

АЦП, применяемые для ввода информации в микропроцессорную систему, являются источниками погрешностей. Погрешности могут увеличиваться при использовании тех или иных алгоритмов последующих вычислений, например, при операциях с величинами x и y , полученными с погрешностями δx

и δy , их сумма будет иметь погрешность $\frac{|x|}{|x+y|} \delta x + \frac{|y|}{|x+y|} \delta y$, произведение или частное $\delta x + \delta y$ и т. п.

В настоящее время разработано большое количество типов АЦП, удовлетворяющих широкому спектру требований. Для некоторых из них преобладающими параметрами являются высокая точность и временная стабильность преобразования, для других большее значение имеет скорость преобразования. Независимо от принципов работы все АЦП имеют погрешность квантования, связанную с представлением непрерывной входной величины конечным множеством числовых значений.

Идеальный квантователь имеет ступенчатую номинальную функцию преобразования. При этом приведенная к входу погрешность функции преобразования (погрешность квантования) в зависимости от входной величины определяется выражением¹

$$\Delta_R(x) = q \left[h(x) - \frac{x}{q} \right] = 0,5q - qFr \left[\frac{x + 0,5q}{q} \right], \quad (1)$$

где x — входная величина; $h(x)$ — вектор цифровых кодов на выходе АЦП; $Fr[\cdot]$ — символ, обозначающий дробную часть числа; q — шаг квантования, равный $\frac{x_k - x_n}{2^n}$; $(x_k - x_n)$ — динамический диа-

пазон АЦП; n — разрядность АЦП.

Цель работы — исследование влияния погрешности представления исходных данных АЦП на точности вычислительных алгоритмов микропроцессорной системы балансировочного станка.

При построении частотно-избирательного тракта балансировочного станка существуют два подхода. Во-первых, возможно использование фильтров, выделяющих полезный сигнал из спектра помех, тогда амплитуда первой гармоники несет информацию о величине того или иного дисбаланса (в зависимости от системы датчиков), а сдвиг фаз между максимумом первой гармоники (строб "тяжелого" моста) и сигналом от метки на поверхности ротора — об угле дисбаланса. Если подобным образом определяют векторы статического и моментного дисбалансов, то вектор динамиче-

¹Шлык Г. П. Измерение параметров интегральных ЦАП и АЦП. М.: Радио и связь, 1985.

ского дисбаланса, приведенный к плоскостям коррекции A и B ,

$$\begin{cases} \vec{D}_{DA} = \vec{D}_{MA} + \frac{\vec{D}_C L_B}{L}; \\ \vec{D}_{DB} = \vec{D}_{MB} + \frac{\vec{D}_C L_A}{L}, \end{cases} \quad (2)$$

или, переходя к величинам неуравновешенных масс и соответствующим им углам,

$$m_{DA} = \sqrt{\left(\frac{m_C L_B}{L}\right)^2 + m_M^2 + m_M \frac{m_C L_B}{L} \cos(\varphi_C - \varphi_M)}; \quad (3)$$

$$m_{DB} = \sqrt{\left(\frac{m_C L_A}{L}\right)^2 + m_M^2 - m_M \frac{m_C L_A}{L} \cos(\varphi_C - \varphi_M)}; \quad (4)$$

$$\varphi_{\Sigma A} = \arctg \left(\frac{\frac{m_C L_B}{L} \sin \varphi_C + m_M \sin \varphi_M}{\frac{m_C L_B}{L} \cos \varphi_C + m_M \cos \varphi_M} \right); \quad (5)$$

$$\varphi_{\Sigma B} = \arctg \left(\frac{\frac{m_C L_A}{L} \sin \varphi_C - m_M \sin \varphi_M}{\frac{m_C L_A}{L} \sin \varphi_C - m_M \cos \varphi_M} \right), \quad (6)$$

где m_{DA} , m_{DB} , m_C , m_M — масса динамического, статического и моментного дисбалансов соответственно; φ_{DA} , φ_{DB} , φ_C , φ_M — углы расположения масс динамического, статического и моментного дисбалансов соответственно; L — расстояние между плоскостями коррекции; L_A , L_B — расстояние от соответствующей плоскости коррекции до центра ротора соответственно.

При этом расчеты параметров динамического дисбаланса в плоскостях коррекции имеют относительные погрешности.

Для плоскости A :

$$\begin{aligned} \delta D_A = 2 & \left[\left(\frac{m_C^2 + m_M^2}{m_C^2 + m_M^2 + m_C m_M \cos(\varphi_C - \varphi_M)} \right) \times \right. \\ & \times \left(\frac{2m_C^2 \delta m_C + 2m_M^2 \delta m_M}{m_C^2 + m_M^2} \right) + \\ & + \left(\frac{m_C m_M \cos(\varphi_C - \varphi_M)}{m_C^2 + m_M^2 + m_C m_M \cos(\varphi_C - \varphi_M)} \right) \times \\ & \times \left. \left(\delta m_C + \delta m_M + \frac{\varphi_C \delta \varphi_C + \varphi_M \delta \varphi_M}{\varphi_C - \varphi_M} \right) \right]; \quad (7) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta \varphi_A = & \left(\frac{m_C \cos \varphi_C (\delta m_C + \delta \varphi_C) + m_M \cos \varphi_M (\delta m_M + \delta \varphi_M)}{m_C \cos \varphi_C + m_M \cos \varphi_M} + \right. \\ & \left. + \delta D_A \right). \quad (8) \end{aligned}$$

Для плоскости B :

$$\begin{aligned} \delta D_B = 2 & \left[\left(\frac{m_C^2 + m_M^2}{m_C^2 + m_M^2 + m_C m_M \cos(\varphi_C - \varphi_M)} \right) \times \right. \\ & \times \left(\frac{2m_C^2 \delta m_C + 2m_M^2 \delta m_M}{m_C^2 - m_M^2} \right) + \\ & + \left(\frac{m_M m_C \cos(\varphi_C - \varphi_M)}{m_C^2 + m_M^2 + m_C m_M \cos(\varphi_C - \varphi_M)} \right) \times \\ & \times \left. \left(\delta m_C + \delta m_M + \frac{\varphi_C \delta \varphi_C + \varphi_M \delta \varphi_M}{\varphi_C - \varphi_M} \right) \right]; \quad (9) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta \varphi_B = & \left(\frac{m_C \cos \varphi_C (\delta m_C + \delta \varphi_C) + m_M \cos \varphi_M (\delta m_M + \delta \varphi_M)}{m_C \cos \varphi_C + m_M \cos \varphi_M} + \right. \\ & \left. + \delta D_B \right), \quad (10) \end{aligned}$$

где δD_A , δD_B , $\delta \varphi_A$, $\delta \varphi_B$ — результирующие относительные погрешности вычисления величин и углов динамического дисбаланса в плоскостях A и B соответственно; δm_A , δm_B , $\delta \varphi_C$, $\delta \varphi_M$ — исходные относительные погрешности величин, связанные с погрешностью квантования АЦП, и углов статического и моментного дисбалансов соответственно.

На рис. 1 и 2 приведены результаты расчетов распределения относительных погрешностей вы-

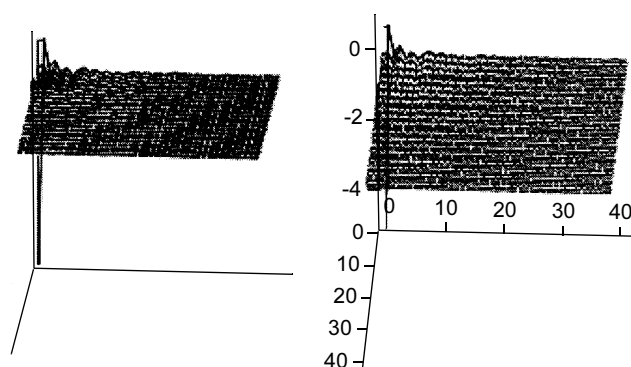


Рис. 1. Распределение относительных погрешностей вычисления δD_A (а) и $\delta \varphi_A$ (б) вектора динамического дисбаланса в плоскости A

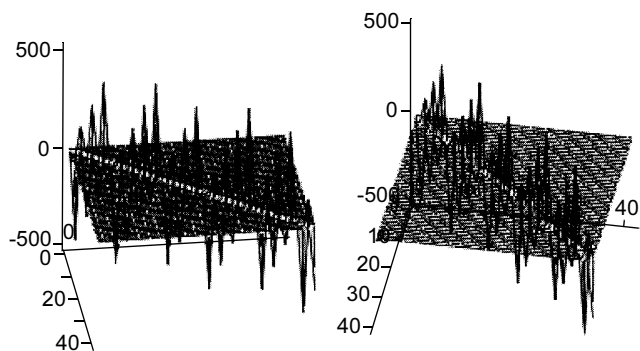


Рис. 2. Распределение относительных погрешностей вычисления δD_B (а) и $\delta \varphi_B$ (б) вектора динамического дисбаланса в плоскости В

числения величины и угла вектора динамического дисбаланса в плоскостях А и В при сложении векторов статического и моментного дисбалансов, определенных раздельно. При этом угол между векторами дисбаланса равен нулю (что приводит к наибольшим погрешностям), а погрешность измерения угла векторов принимали равной 1° . Величину неуравновешенных масс определяли восьмиразрядным АЦП, входное напряжение которого изменилось от 0 до 5 В. Таким образом, соответствующий входному напряжению цифровой код изменился от 0 до 255.

Расчетным путем установлено, что наибольшие погрешности вычислений характерны для начала рабочего диапазона АЦП, т. е. когда величины векторов статического и моментного дисбалансов близки к нулю. Максимальное значение $\delta D_A = -4$ соответствует нулевым значениям складываемых векторов, при этом $\delta D_A = 0,65 \div 0,68$, когда хотя бы один из векторов имеет значение 1, что соответствует абсолютной погрешности $\Delta D_A = 0,0068 \div 0,15$. При больших числовых значениях векторов погрешности вычисления величины динамического дисбаланса заметно снижаются.

Аналогичная картина наблюдается для погрешности вычисления угла дисбаланса в плоскости А. Максимальное значение $\delta \varphi_A = -5$ соответствует нулевым значениям складываемых векторов, при этом абсолютная погрешность равна 136° (не следует пугаться такой погрешности, так как величина вектора при этом равна нулю). Относительная погрешность $\delta \varphi_A$ приблизительно равна 0,8, когда хотя бы один из векторов имеет значение 1, что соответствует абсолютной погрешности $\Delta \varphi_A = 38^\circ$. В этом случае процесс уравнивания может стать не сходящимся. При увеличении величин статического и моментного дисбалансов погрешность вычисления угла динамического дисбаланса за-

метно снижается и после величины того или иного дисбаланса, равной 7 и более, не превышает 1° .

Расчеты аналогичных погрешностей, полученные для плоскости В, дают другую картину. Погрешности вычисления величины и угла вектора динамического дисбаланса незначительны практически во всем диапазоне распределения, кроме случаев, когда векторы статического и моментного дисбалансов равны по абсолютной величине (и противоположны по направлению, так как в плоскости В эти векторы вычитаются). В этом случае погрешности определения параметров вектора динамического дисбаланса имеют недопустимые значения и уравнивание становится невозможным. Последнее связано с тем, что при вычитании близких по абсолютному значению величин (знаменатель со-

множителя выражения (9)
$$\frac{2m_C^2 \delta m_C + 2m_M^2 \delta m_M}{m_C^2 - m_M^2}$$

стремится к нулю) погрешности резко возрастают и использование методики векторного сложения статического и моментного дисбалансов приводит к неверным результатам. Вышесказанное имеет место, когда углы моментного и статического дисбалансов равны между собой, в других случаях погрешности имеют вполне допустимые значения.

Вторым подходом к определению параметров дисбалансов является использование хорошо зарекомендовавшего себя метода четырехквadrантного перемножения частоты, когда сигнал с датчиков, засоренный высокочастотной помехой, умножается на опорные квадратурные напряжения, синхронизированные с меткой на роторе. В результате формируются уровни постоянного напряжения, пропорциональные ортогональным проекциям вектора дисбаланса D_X и D_Y , которые преобразуются АЦП в цифровой код и вводятся в ЭВМ балансировочного комплекса для вычисления параметров дисбаланса.

Если ортогональные проекции статического и моментного дисбалансов определяются отдельно (например для каждого из дисбалансов своя система датчиков), то для вычисления вектора динамического дисбаланса возможно суммирование ортогональных проекций векторов каждого из дисбалансов:

$$\begin{cases} D_X = C_X + M_X; \\ D_Y = C_Y + M_Y, \end{cases} \quad (11)$$

где D_X , C_X , M_X , D_Y , C_Y , M_Y — проекции динамического, статического и моментного дисбалансов соответственно на ось X и Y.

Тогда величина и угол вектора динамического дисбаланса соответственно равны:

$$\begin{cases} D = \sqrt{D_X^2 + D_Y^2}; \\ \varphi D = \arctg\left(\frac{D_Y}{D_X}\right). \end{cases} \quad (12)$$

Определим погрешности вычислительных операций в соответствии с выражениями (11) и (12).

После ряда преобразований получим

$$\begin{aligned} \delta D &= \\ &= 4 \frac{(C_X \delta C_X + M_X \delta M_X)(C_X + M_X) +}{(C_X + M_Y)^2 +} \rightarrow \\ &\rightarrow \frac{+ (C_X \delta C_Y + M_X \delta M_Y)(C_Y + M_Y)}{+ (C_Y + M_Y)^2}; \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \delta \varphi &= \\ &= \frac{\left(\frac{C_Y + M_Y}{C_X + M_X}\right) \left(\frac{C_X \delta C_X + M_X \delta M_X}{C_X + M_X} + \frac{C_Y \delta C_Y + M_Y \delta M_Y}{C_Y + M_Y}\right)}{\left|\arctg\left(\frac{C_Y + M_Y}{C_X + M_X}\right)\right| \left(1 + \left(\frac{C_Y + M_Y}{C_X + M_X}\right)^2\right)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Анализ результатов расчетов показывает, что при измерении проекций C_X , C_Y , M_X и M_Y восьмиразрядным АЦП, входное напряжение которого может меняться от -5 до 5 В, а выходной код соответственно от -128 до 127 , относительная погрешность вычисления величины вектора дисбаланса δD изменяется в пределах от $-0,083$ до $0,156$ и максимальна в начале рабочего диапазона, а относительная погрешность вычисления угла дисбаланса $\delta \varphi$ лежит в пределах от $-0,001$ до $0,0023$ и всегда равна нулю, если хотя бы одна из проекций равна нулю. В целом погрешности вычисления параметров вектора дисбаланса по ортогональным проекциям имеют незначительные величины.

На рис. 3 показано распределение относительных погрешностей вычисления величины и угла динамического дисбаланса при сложении ортогональных проекций статического и моментного дисбалансов. Расчеты показывают, что $\delta D_{\max} = 4$, $\delta \varphi_{\max} = 1,459$ — максимальные погрешности образуются в области значений, близких к нулю.

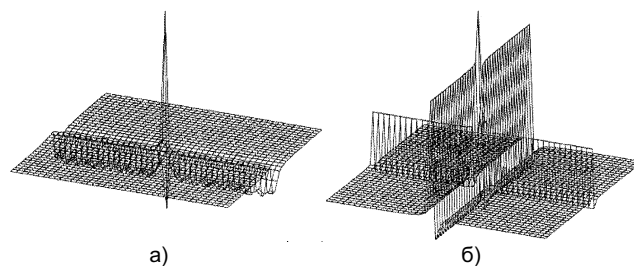


Рис. 3. Распределение относительных погрешностей вычисления δD (а) и $\delta \varphi$ (б) динамического дисбаланса при сложении ортогональных проекций статического и моментного дисбалансов

В результате анализа расчетов установлено, что $\delta D = 4$ при $C_X + M_X = C_Y + M_Y = 0$, что соответствует $D = 0$ с абсолютной погрешностью $\Delta D = 0,000047$. Гораздо худший результат получается при $C_X + M_X = C_Y + M_Y = 1$, когда $\delta D = 1,04$, что соответствует абсолютной погрешности $\delta D = 2,9$. С ростом величин C_X , C_Y , M_X , M_Y погрешности резко уменьшаются и становятся пренебрежимо малыми.

При вычислении угла динамического дисбаланса максимальные значения погрешностей наблюдаются в основном в области малых значений ортогональных проекций статического и моментного дисбалансов на углах 0° , 90° , 180° и 270° (векторы статического и моментного дисбалансов близки по абсолютной величине и противоположны по направлению) и составляют $\delta \varphi = 0,017 \div 0,022$, что соответствует абсолютной погрешности порядка сотых долей градуса.

Приведенные расчетные значения погрешностей соответствуют восьмиразрядному АЦП, и при использовании АЦП большей разрядности с тем же динамическим диапазоном будут уменьшаться, однако общий характер распределения останется таким же.

Таким образом, методика определения динамического дисбаланса по сумме ортогональных проекций векторов статического и моментного дисбалансов предпочтительнее методики векторного суммирования с точки зрения величин погрешностей проведения вычислительных операций, кроме того в этом случае погрешности вычислений параметров дисбалансов для плоскостей A и B одинаковы.

А. Я. РОЗИНОВ, канд. техн. наук
ЦНИИ технологии машиностроения

Применение показателя проникающей способности испытательных сред и жидких грузов для оценки пороговой чувствительности контроля локальной герметичности

Для правильного выбора метода контроля локальной герметичности и оценки его соответствия требованиям, предъявляемым к испытываемым конструкциям, в настоящее время применяется единая унифицированная система параметров, в основу которой положены характеристики проникающей способности испытательных сред и жидких грузов. Это позволяет оценивать сквозные микронеплотности сварных соединений независимо от формы их каналов по показателю натекания ($\text{м}^3 \cdot \text{Па/с}$), определенному по количеству воздуха, которое сквозная микронеплотность способна пропустить из атмосферы в объем, вакуумированный до давления, пренебрежимо малого по сравнению с атмосферным. Данный критерий позволяет оценить порог чувствительности любого способа контроля локальной герметичности и выполнять численное сравнение проникающей способности любого из транспортируемых жидких грузов.

Согласно законам механики истечения жидкостей и газов, а также физической основе осуществления локального контроля герметичности судовых конструкций, значение порога герметичности, характеризующее чувствительность любого гидравлического или воздушного контроля, определяется минимальными размерами выявляемых сквозных микронеплотностей сварных соединений.

В процессе проведения контроля на локальную герметичность гидравлическим способом условием выявления сквозных микронеплотностей является наличие на поверхности контролируемой конструкции воды в количестве, достаточном для визуального обнаружения. При этом закономерности истечения воды из выявляемых сквозных микронеплотностей во многом определяются величиной испытательного давления и формой каналов этих микронеплотностей.

Проведенными исследованиями установлено, что испытываемые на локальную герметичность сварные соединения судовых конструкций имеют сквозные микронеплотности, главным образом в виде пор, аналогичных по форме трубчатым каналам. Поэтому расход воды Q_T , проходящей через

сквозные микронеплотности, может быть вычислен на основе закона Пуазейля

$$Q_T = \frac{\pi(p_1 - p_2)r^4}{8\eta l}, \quad (1)$$

где p_1, p_2 — давление на концах трубчатого канала; r, l — радиус и длина трубчатого канала соответственно; η — коэффициент динамической вязкости жидкости.

В зависимости от действующих сил процесс движения воды по каналам микронеплотностей можно разбить на три этапа: вход воды в канал неплотности; подъем воды по каналу неплотности; движение воды после ее выхода на контрольную поверхность.

Такое деление позволяет определить минимальные размеры неплотностей, по которым возможно движение воды при условии несмачивания поверхности испытываемого соединения, время течения воды по каналу неплотности, а также размеры неплотностей, которые могут быть обнаружены гидравлическими испытаниями (по принятому наименьшему для визуального обнаружения объему вытекающей воды).

На первом этапе движения вода находится под действием гидравлического давления p_1 столба жидкости и капиллярного противодействия p_2 , величина которого соответствует выражению

$$p_2 = \frac{2\alpha}{r}, \quad (2)$$

где α — коэффициент поверхностного натяжения; r — радиус кривизны поверхности воды в капилляре канала, направленной выпуклостью в сторону выхода из канала микронеплотности.

С учетом малости радиуса канала микронеплотностей $r = r$ выражение (2) может быть записано в виде

$$p_2 = \frac{2\alpha}{r}. \quad (3)$$

При движении воды на втором этапе она оказывается под действием гидравлического давления p_1 столба жидкости, капиллярного противодействия p_2 , силы внутреннего трения P_3 и силы тяжести P_4 , создаваемой массой воды m в канале микронеплотности, определяемой выражением

$$m = \frac{\gamma}{g} \pi r^2 l, \quad (4)$$

где γ — масса единицы объема воды, находящейся в канале микронеплотности; l — длина (протяженность) канала сквозной микронеплотности, заполненного водой; g — ускорение силы тяжести.

В результате на объем воды длиной l в канале сквозной микронеплотности действуют следующие силы: испытательного давления ($p_1 \pi r^2$); поверхностного натяжения ($\alpha 2 \pi r \cos \theta$); внутреннего трения ($8 \pi \eta \omega l$) и сила тяжести ($\gamma \pi r^2 l$).

С учетом угла смачивания θ скорость перемещения воды по каналу микронеплотности характеризуется выражением

$$\omega = \frac{(p_1 r + 2 \alpha \cos \theta) r}{8 \eta l}. \quad (5)$$

В этом случае время истечения жидкости через канал микронеплотности определяется выражением

$$t = \frac{4 \eta l^2}{r(p_1 r + 2 \alpha \cos \theta)}. \quad (6)$$

На третьем этапе движения воды минимальные размеры выявляемых микронеплотностей определяются количеством воды, истекающей за время проведения контроля локальной герметичности.

Известно, что закон Пуазейля, выраженный формулой (1), применим только для ламинарного истечения жидкости и при условии, что протяженность канала микронеплотности, через который она истекает, превышает длину "начального" участка, на протяжении которого устанавливается закон распределения скоростей.

Поскольку порог чувствительности определяется минимальным размером выявляемых сквозных микронеплотностей, то в этих условиях истечение воды будет подчиняться ламинарному закону, характеризующемуся выражением

$$Re = \frac{d \gamma \omega_{cp}}{\eta} < Re_{кр}, \quad (7)$$

где Re — число Рейнольдса; $Re_{кр}$ — критическое число Рейнольдса; d — диаметр канала выявляемой минимальной сквозной микронеплотности; ω_{cp} — средняя скорость течения воды в канале микронеплотности, определяемая выражением

$$\omega_{cp} = \frac{r^2 (p_1 - p_2)}{8 \eta l}. \quad (8)$$

В выражении (8) $p_1 - p_2$ составляет перепад гидростатического давления $\Delta p_{ж}$ по обе стороны канала минимальной сквозной микронеплотности, в которой истечение жидкости характеризуется числом Рейнольдса

$$Re = \frac{\gamma r^2 \Delta p_{ж}}{8 \eta l} Re_{кр}. \quad (9)$$

При этом, поскольку порог чувствительности определяется величиной минимальной обнаруживаемой течи воды, то показатель порога чувствительности гидравлического контроля локальной герметичности будет равен

$$B = \frac{V_{min} \eta_{ж} p_a^2}{t \eta_{в} 2 \Delta p_{ж}}, \quad (10)$$

где V_{min} — визуально определяемый объем минимальной капли воды; $\eta_{ж}$ — коэффициент динамической вязкости воды; p_a — атмосферное давление; $\eta_{в}$ — коэффициент динамической вязкости воздуха.

Опыт проведения гидравлических испытаний на локальную герметичность показал, что вытекающая из сквозных микронеплотностей вода может принимать различную форму, зависящую от условий ее смачивания контролируемой поверхности корпусных конструкций. Известно, что угол смачивания θ чистых металлов составляет от 3 до 11°. Фактически θ значительно больше, ибо зависит не только от чистоты поверхности смачиваемого металла, но также от того, натекает ли вода на поверхность металла или стекает с его поверхности. Даже при кратковременном соприкосновении с атмосферой поверхность металлических изделий покрывается жирной пленкой, молекулярный слой которой способен намного повысить угол смачивания θ .

При загрязнении металла маслом $\theta = \pi$.

С учетом указанных выше пределов изменения θ определены минимальные размеры радиусов водной пленки, выявляющей сквозные микронеплотности судовых конструкций. Рассмотрим два случая, характеризующиеся смачиванием или не смачиванием поверхности сварных конструкций, контролируемых на локальную герметичность. В случае смачивания вода, применяемая для контроля на локальную герметичность, растекается в виде пленки, толщина которой δ_n остается постоянной при определенном значении θ . В результате

минимальный радиус пятна, образующегося из пленки воды, определяется по формуле

$$r_{\min}^n = \sqrt{\frac{Q_{\text{вод}}}{\pi \delta_{\text{п}}}}, \quad (11)$$

где $Q_{\text{вод}}$ — количество воды, вытекающей из канала сквозной микронеплотности сварного соединения.

Расчеты, выполненные по формуле (11), позволили определить, что минимальные размеры радиусов $r_{\min}^n$ при смачивании поверхности корпусных конструкций составляют от $5 \cdot 10^{-4}$ до $8 \cdot 10^{-4}$ см.

При несмачиваемой поверхности испытываемых корпусных конструкций вытекающая из сквозных микронеплотностей вода собирается в капли, минимальный радиус которых определяется по формуле

$$r_{\min}^k = 4 \sqrt{\frac{8 \eta_{\text{ж}} Q_{\min}^{\text{вод}} l}{\pi \Delta p_{\text{ж}} t}}, \quad (12)$$

где $Q_{\min}^{\text{вод}}$ — минимальное количество вытекающей воды, образующей каплю с минимальными для визуального обнаружения размерами.

С использованием выражения (12) и результатов экспертной оценки установлено, что минимальная капля воды, которая может быть визуально обнаружена в процессе проведения гидравлических испытаний, характеризуется радиусом $r_{\min}^k = 1,5$ мм, что соответствует объему капли $V_{\min} = 14$ мм³. С учетом величины $V_{\min}$ по формуле (10) выполнен расчет показателей порога чувствительности. При этом, согласно практике, продолжительность испытаний наливом воды $t = 1$ ч, а при испытаниях поливом воды $t = 10$ с. Соответственно избыточное гидравлическое давление до 0,01 МПа рассматривали как параметр испытаний поливом воды, а более высокие его значения — как параметр испытаний на-

ливом воды под напором. Результаты проведенных расчетов представлены в табл. 1.

Условием обнаружения микронеплотностей сварных соединений малых размеров при контроле локальной герметичности сжатым воздухом является превышение величины испытательного давления p_1 над капиллярным противодействием изогнутой мыльной пленки p_2 , т. е. обеспечением условия $p_1 > p_2$.

В процессе проведения безводного контроля локальной герметичности с использованием сжатого воздуха на изогнутую мыльную пленку воздействует система сил, включающих испытательное давление воздуха p_1 и капиллярное давление p_2 . Однако из-за того, что изогнутая мыльная пленка имеет две поверхности соприкосновения с воздухом (наружную и внутреннюю), силы поверхностного натяжения действуют на пленку с обеих ее сторон. При этом действие сил по наружной поверхности создают капиллярное давление p_2^H , которое направлено внутрь образующихся пузырей и составляет

$$p_2^H = \frac{2\alpha_{\text{п}}}{\rho_{\text{п}}}, \quad (13)$$

где $\alpha_{\text{п}}$ — коэффициент поверхностного натяжения мыльной пленки; $\rho_{\text{п}}$ — радиус кривизны поверхностей пленки.

Если пренебречь толщиной мыльной пленки, можно считать одинаковыми радиусы кривизны ее наружной и внутренней поверхностей. Тогда силы поверхностного натяжения, действующие по внутренней поверхности, создают капиллярное давление $p_2^{\text{ВН}}$, равное по величине p_2^H и направленное в ту же сторону.

Общее капиллярное давление в этом случае составит

$$p_2 = p_2^H + p_2^{\text{ВН}} = \frac{2\alpha}{\rho} + \frac{2\alpha}{\rho} = \frac{4\alpha}{\rho}. \quad (14)$$

С увеличением испытательного давления уменьшается радиус кривизны поверхности пленки $R_{\text{п}}$ и, следовательно, увеличивается давление p_2 , которое достигает максимального значения, когда $R_{\text{п}}$ достигнет радиуса канала неплотности r . При дальнейшем увеличении p_1 радиус пузыря $R_{\text{п}}$ начнет увеличиваться, что вызовет уменьшение p_2 и потерю устойчивости пузыря. В результате критическим является испытательное давление $p_{1r}^{\text{кр}}$, при котором $R_{\text{п}} = r$ канала сквозной микронеплотности.

Таблица 1

Гидростатическое давление, МПа	Показатель порога чувствительности гидравлического локального контроля герметичности, м ³ · Па/с	
	Время выдержки 1 ч	Время контакта воды с поверхностью 10 с
0,01	$0,9 \cdot 10^{-4}$	$0,4 \cdot 10^{-1}$
0,02	$0,7 \cdot 10^{-4}$	$0,2 \cdot 10^{-1}$
0,05	$0,3 \cdot 10^{-4}$	$0,8 \cdot 10^{-2}$
0,10	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$0,4 \cdot 10^{-2}$
0,15	$0,8 \cdot 10^{-5}$	$0,25 \cdot 10^{-2}$
0,20	$0,6 \cdot 10^{-5}$	$0,15 \cdot 10^{-2}$

Поэтому условием образования устойчивого пузыря является неравенство

$$p_1 < p_{1r}^{кр}. \quad (15)$$

Образование неустойчивого пузыря будет обеспечено при условии

$$p_1 \geq p_{1r}^{кр}. \quad (16)$$

Обнаружить устойчивые пузыри во время контроля локальной герметичности практически невозможно из-за их малых размеров, поэтому в основу определения порога чувствительности безводного контроля давлением сжатого воздуха может быть положена физическая взаимосвязь показателя частоты образования пузырьков пенообразующего состава и величины потока сжатого воздуха $Q_{возд}$, проходящего через канал сквозной микронеплотности диаметром d и длиной l . При этом должны быть учтены схема сил, действующих на образующийся пузырек пенообразующего состава, при которой давление истекающего воздуха в образующемся пузырьке должно быть, по крайней мере, равно суммарному воздействию атмосферного давления вне пузырька. Согласно указанной силовой схеме, внутреннее давление в пузырьке $p_{вн}$ создается потоком сжатого воздуха $Q_{возд}$, проходящего через канал сквозной микронеплотности и натекающего в объем пузырька V_n за время t . В результате давление на пузырек диаметром D извне складывается из атмосферного давления p_a

и капиллярного давления $p_n = \frac{4d_n}{D}$, обусловленного коэффициентом поверхностного натяжения α используемого пенообразующего состава. Поэтому для процесса образования пузырьков справедливо равенство

$$p_{вн} = p_n + p_a. \quad (17)$$

Используя равенство (17) и положение о том, что поток воздуха $Q_{возд}$ определяется произведением давления на объем, получим аналитическое выражение для потока, истекающего сжатого воздуха в виде

$$Q_{возд} = \frac{\pi D_o^3}{6t_o} \left(\frac{4d_n}{D_o} + p_a \right), \quad (18)$$

где нулевой индекс характеризует рассматриваемые величины к моменту разрушения пузырьков.

Результаты исследований характера истечения потока сжатого воздуха по каналам микронеплотностей малого диаметра свидетельствуют о незначительной величине первого члена суммы уравнения (18), поэтому поток истекающего воздуха

$$Q_{возд} = \frac{\pi D_o^3}{6t} p_a. \quad (19)$$

С учетом показателя частоты формирования воздушных пузырьков n , образующихся за время наблюдения Δt , получим

$$Q_{возд} = \frac{n\pi D_o^3}{6\Delta t} p_a. \quad (20)$$

Таким образом, для определения порога чувствительности безводного контроля давлением сжатого воздуха с использованием пенообразующего состава следует задавать предельно малые геометрические размеры образующихся пузырьков и самую низкую частоту их появления. При этом можно считать, что в начальный момент образования пузырька его минимальный диаметр равен диаметру канала сквозной микронеплотности d . Это позволяет выразить силу, удерживающую образующийся пузырек у выхода из канала сквозной микронеплотности, в виде $F_n = \pi d \alpha$, а силу, выталкивающую пузырек из канала сквозной микронеплотности, в

виде $F_a = \frac{\pi D_o^3}{6} g \gamma_{ж}$, где g — ускорение силы тяжести, $\gamma_{ж}$ — плотность жидкости.

В момент отрыва пузырька $F_n = F_a$, поэтому диаметр пузырька

$$D_o = \sqrt[3]{\frac{6d\alpha}{g\gamma_{ж}}}. \quad (21)$$

Согласно формуле (21), из канала сквозной микронеплотности диаметром $d = 1$ мм при длине этого канала $l = 10$ мм можно ожидать появления пузырьков диаметром $D_o = 0,7$ мм. Если задаться минимальной площадью участка испытываемой конструкции $S = 4$ мм², хорошо видимой при осмотре, тогда с учетом диаметра пузырьков $D_o = 0,7$ мм их должно образоваться за время наблюдения не менее 11. С учетом такого количества пузырьков при расчете порога чувствительности безводного контроля локальной герметичности избыточным давлением сжатого воздуха продолжительность времени наблюдения может составлять 5 мин. По формуле (20) можно определить минимально регистрируемый поток сжатого воздуха $Q_{min} = 5 \cdot 10^{-3}$ м³ · Па/с. Аналогично можно также определить минимально регистрируемый поток сжатого воздуха, характеризующий безводный контроль локальной герметичности обдувом сжатого воздуха с применением пенообразующего состава. В этом случае в формуле (20) Δt следует принять не более 3 с.

В связи с тем, что показатель порога чувствительности характеризуется минимальным количеством воздуха, который могут пропустить в еди-

Таблица 2

Избыточное давление сжатого воздуха, МПа	Показатель порога чувствительности безводного контроля локальной герметичности судовых конструкций, м ³ ·Па/с	
	Надув сжатым воздухом	Обдув сжатым воздухом
0,01	$0,5 \cdot 10^{-5}$	$0,5 \cdot 10^{-3}$
0,02	$0,2 \cdot 10^{-5}$	$0,16 \cdot 10^{-3}$
0,05	$0,7 \cdot 10^{-6}$	$0,7 \cdot 10^{-4}$
0,10	$0,2 \cdot 10^{-6}$	$0,3 \cdot 10^{-4}$
0,15	$0,1 \cdot 10^{-6}$	$0,1 \cdot 10^{-4}$
0,20	$0,9 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

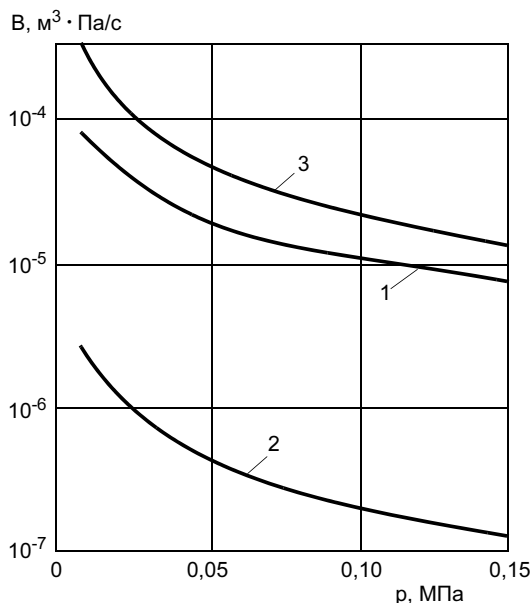


Рис. 1. Пороговая чувствительность контроля локальной герметичности водой и сжатым воздухом: 1 — обдув сжатым воздухом; 2 — налив водой; 3 — надув сжатым воздухом

ницу времени при атмосферном давлении рассматриваемые сквозные микронеплотности сварных соединений, величина этого показателя для безводного контроля локальной герметичности надувом и обдувом сжатого воздуха определяется формулой

$$B_{\min} = \frac{Q_{\min}^{\text{вод}}}{\frac{p_{\text{опр}}^2}{p_a^2} - 1}, \quad (22)$$

где $p_{\text{опр}}$ — абсолютное давление, равное сумме испытательного и атмосферного давления.

Полученные на основе формулы (22) значения порога чувствительности безводного контроля ло-

кальной герметичности с использованием сжатого воздуха приведены в табл. 2.

По результатам расчетов, приведенных в табл. 1 и 2, построены графики (рис. 1), характеризующие показатель порога чувствительности кон-

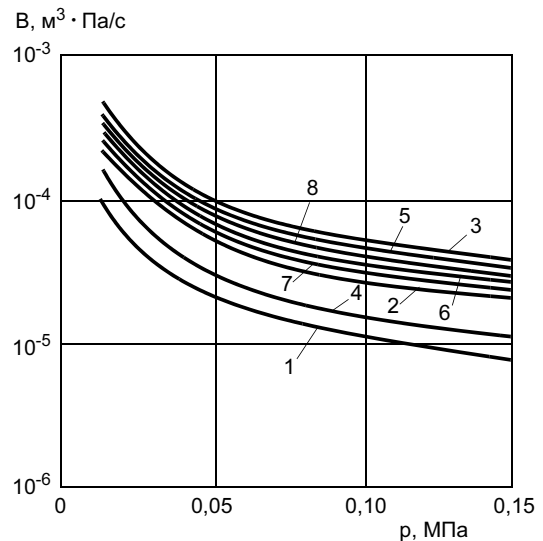


Рис. 2. Проникающая способность морской воды, дизельных и печных бытовых топлив соответственно их вязкости η : 1 — морская вода; 2 — дизельное ($\eta = 0,0026$ Па·с) и печное бытовое ($0,0025$ Па·с) топлива; 3—6 — дизельное топливо (η равно 0,0052, 0,0015, 0,0042, 0,0033 Па·с соответственно); 7, 8 — печное бытовое топливо (η равно 0,003 и 0,0035 Па·с соответственно)

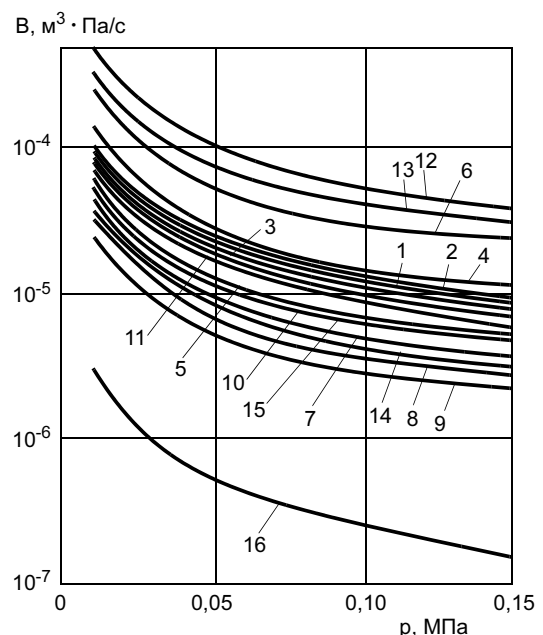


Рис. 3. Проникающая способность химических грузов, морской воды и сжатого воздуха: 1 — морская вода и этиловый спирт; 2 — этилендиамин моноэтиловый спирт, циклогексан; 3 — Н-амиловый ацетат, додексан; 4 — амиловый ацетат; 5 — диэтилбензол; 6 — этилбензол; 7 — гептан; 8 — гексан; 9 — ацетон, Н-пентан; 10 — пентан, толуол; 11 — ксилол; 12 — изобутиловый спирт; 13 — Н-бутиловый спирт; 14 — метиловый ацетат; 15 — метиловый спирт; 16 — сжатый воздух

троля локальной герметичности судовых конструкций воздушным давлением с применением пенообразующего состава и гидравлическим давлением.

Наличие этих графиков позволяет оценить рациональность применения гидравлического и воздушного контроля. В основу такой оценки может быть положена проникающая способность транспортируемых жидких грузов. Такие грузы воздействуют на конструкции, ограничивающие цистерны, герметичность которых контролируют на стадиях их постройки или ремонта гидравлическим или воздушным давлением. Контроль герметичности осуществляют с таким расчетом, чтобы значение предела чувствительности испытательной среды (воды, воздуха) было ниже, чем значение показателя проникающей способности транспортируемых жидких грузов.

Проникающую способность различных жидких грузов рассчитывали по формуле (10). Это позволило получить совмещенные графики (рис. 2, 3), где показатели проникающей способности рассматриваемых жидких грузов представлены совместно с показателями порогов чувствительности гидравлического и воздушного контроля локальной герметичности.

Таким образом, гидравлический метод контроля локальной герметичности рационально использовать для испытаний непроницаемости судовых конструкций, контактирующих с жидкими грузами типа нефти, масел и топлив на основе нефти. При этом герметичность конструкций, ограничивающих цистерны для хранения и транспортирования химических грузов, следует контролировать только воздушным давлением.

В. И. БОЧЕНИН, д-р техн. наук
Курганский государственный университет

Радиоизотопный способ контроля содержания перлита в износостойком чугуне

В работе рассмотрен радиоизотопный рентгенофлуоресцентный способ определения содержания марганца в износостойком чугуне с последующей оценкой содержания перлита по корреляционному уравнению. Физическая сущность способа основана на разработке экспериментального датчика с перемещающимся селективным хромовым фильтром, что позволяет регистрировать в качестве внутреннего стандарта характеристическое К-излучение железа. Применение способа на производстве позволяет снизить количество бракованной продукции.

Известно [1], что формирование конечной металлографической структуры ковкого чугуна происходит в процессе графитизирующего отжига, состоящего из первой, промежуточной и второй стадий. Во время первой стадии (обычно выше 900 °С) зарождаются и растут центры графита за счет растворения и исчезновения эвтектических карбидов. Промежуточная стадия графитизации (медленное охлаждение примерно до 730 °С) проводится для выделения углерода из аустенита в виде графита. И наконец, вторая стадия (обычно выдержка при 720 °С) вызывает распад аустенита на феррит и графит. В зависимости от степени графитизации на этой стадии ковкий чугун может иметь перлитную, перлитно-ферритную или ферритную металлическую основу с включениями хлопьевидного графита. Для получения высокой износостойкости в ков-

кий чугун вводят марганец, который стабилизирует первичный цементит и затрудняет графитизацию цементита перлита. Следовательно, для получения требуемых физико-механических свойств ковкого износостойкого чугуна необходим контроль за содержанием перлита на второй стадии графитизации. В связи с этим на основе экспериментальных данных разработана корреляционная зависимость между содержанием Mn и перлита.

Для экспрессного определения содержания Mn использовали радиоизотопный рентгенофлуоресцентный способ [2] с регистрацией в качестве внутреннего стандарта характеристического К-излучения ($E = 7,1$ кэВ) железа, содержащегося в чугуне. Из-за низкого энергетического разрешения бескристалльной спектрометрии разработали датчик с перемещающимся селективным хромовым фильтром, позволяющим выделять рентгеновскую флуоресценцию Mn ($E = 6,5$ кэВ).

Поток регистрируемого К-излучения Mn при экранировке детектора селективным фильтром [2]

$$N_i^{\text{Mn}} = \frac{K_i C_{\text{Mn}}}{\mu_1 + \mu_i}, \quad (1)$$

где K_i — постоянный коэффициент, зависящий от атомных констант и геометрии измерений; C_{Mn} —

содержание Mn в контролируемой среде; μ_1 , μ_i^{Mn} — массовые коэффициенты поглощения первичного и вторичного излучений.

При открытом фильтре суммарный поток излучения

$$N_i^C = N_i^{\text{Mn}} + N_i^{\text{Fe}}. \quad (2)$$

Откуда получаем

$$N_i^{\text{Fe}} = N_i^C - N_i^{\text{Mn}}, \quad (3)$$

где

$$N_i^{\text{Fe}} = \frac{K_i C_{\text{Fe}}}{\mu_1 + \mu_i^{\text{Fe}}}. \quad (4)$$

При $\mu_i^{\text{Mn}} \approx \mu_i^{\text{Fe}}$ и сокращении постоянных отношения выражений (1) и (4) примет вид

$$\frac{N_i^{\text{Mn}}}{N_i^{\text{Fe}}} = \frac{C_{\text{Mn}}}{C_{\text{Fe}}}. \quad (5)$$

Тогда

$$C_{\text{Mn}} = C_{\text{Fe}} \frac{N_i^{\text{Mn}}}{N_i^{\text{Fe}}}. \quad (6)$$

Исследовали образцы из ковкого чугуна КЧ60-3 размером $35 \times 35 \times 4$ мм с известным содержанием

Мn и Fe. Поверхностный слой образцов выравнивали грубой и тонкой шлифовкой. Измерения выполняли с помощью серийного гамма-спектрометра БРА-6 (бескристальный рентгеновский анализатор) и экспериментального датчика с пропорциональным детектором СИ-6Р. Структурная схема регистрирующей установки приведена на рис. 1. Гамма-квантами двух радионуклидов 1 облучается поверхность 2 контролируемой среды. Поток вторичного К-излучения Мn и Fe измеряется детектором 4, перед входным окошком которого установлен перемещающийся селективный фильтр 3. С детектора сигнал поступает через предусилитель 5 в гамма-спектрометр 6, на выходе которого измеряется в виде скорости счета (имп/с).

Каждый образец устанавливали в прободержатель датчика 7 (см. рис. 1), облучая поверхностный слой гамма-квантами двух радионуклидов ^{109}Cd ($E = 22$ кэВ, активность каждого 0,5 Бк). При закрытом фильтре 3 регистрировали поток рентгенофлуоресцентного К-излучения Мn (N_i^{Mn}), а при от-

крытом — суммарный поток N_i^C . Определив поток характеристического К-излучения железа по формуле (3), по результатам измерений строили аналитический график (рис. 2). Видно, что зависимость отношения N_i^{Fe}/N_i^C от содержания железа линейная. Используя калибровочный график (см. рис. 2), при измерениях определяли содержание Fe ($C_{\text{Fe}}^{\text{э}}$) в каждом образце. Рассчитав отношение $N_i^{\text{Mn}}/N_i^{\text{Fe}}$, по формуле (6) определяли содержание Мn.

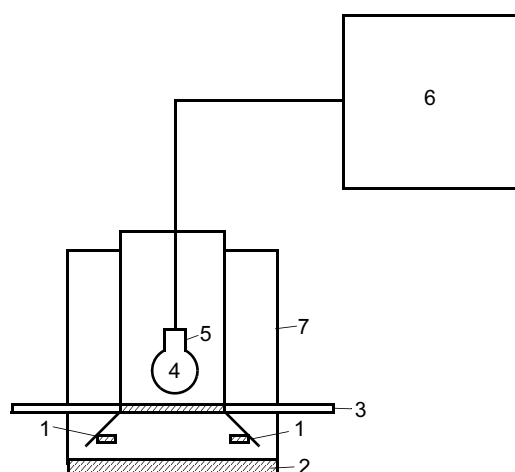


Рис. 1. Структурная схема радиоизотопного анализатора

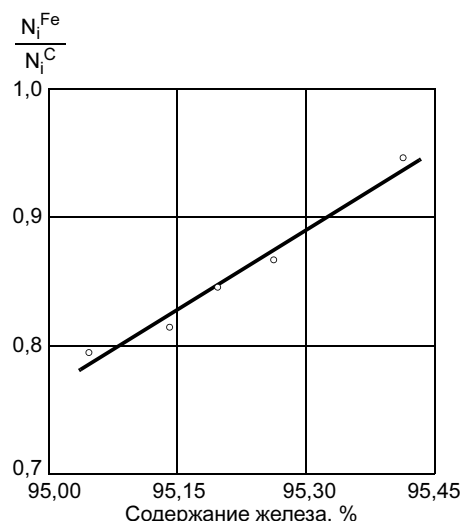


Рис. 2. Зависимость отношения N_i^{Fe}/N_i^C от содержания железа

Таблица 1

Номер образца	Содержание марганца в эталонных образцах, %	Результаты определения содержания марганца радиоизотопным способом, %	Отклонение рентгено-радиометрического способа, %
1	0,49	0,52	+0,03
2	0,56	0,58	+0,02
3	0,61	0,60	–0,01
4	0,78	0,77	–0,01
5	0,83	0,85	+0,02
6	0,95	0,93	–0,02

Таблица 2

Номер образца	ω , %	$\bar{x}$, %	S_x , %	t_3
1	30,8	30,1	0,746	2,10
2	39,1	33,8	1,036	1,73
3	43,5	42,6	0,624	2,75
4	52,8	51,9	0,847	2,61
5	63,4	62,6	1,133	1,73
6	75,2	76,1	0,874	2,53

Металлографическим методом [3] определяли количество перлита в образцах с известным содержанием Mn. По данным эксперимента составляли корреляционное уравнение

$$C_p = 87,51C_{Mn} - 28,75. \quad (7)$$

Для оценки его достоверности использовали шесть образцов из ковкого чугуна КЧ60-3 с известным содержанием перлита. Радиоизотопным способом определяли в каждом образце содержание Mn (табл. 1), а по уравнению (7) — количество перлита. Каждый образец анализировали по 5 раз, рассчитывая среднеквадратичную погрешность и экспериментальное значение t -критерия [4]

$$t_3 = \frac{(\bar{x} - \omega)\sqrt{5}}{S_x}, \quad (8)$$

где $\bar{x}$ — среднее содержание перлита, рассчитанное по уравнению (7); ω — содержание перлита в эталонных образцах; S_x — среднеквадратичная погрешность.

В табл. 2 приведена сравнительная оценка отклонений полученных результатов. Видно, что для всех образцов экспериментальное значение t_3 -критерия меньше 5 %-ного уровня значимости ($t_{0,05} = 2,78$). Следовательно, отклонение полученных данных, рассчитанных по уравнению (7), оказалось на уровне случайных погрешностей.

Изложенные результаты позволили разработать способ контроля содержания перлита в процессе графитизирующего отжига ковкого чугуна КЧ60-3. Регистрирующая установка состояла из выносного датчика, который подключали с помощью кабеля к портативному гамма-спектрометру с автономным питанием (12 В). Основная цель контроля заключалась в том, чтобы в процессе графитизирующего отжига получить чугун с содержанием перлита, близким к эталонным образцам. Перед началом отжига вместе с отливками в печь помещали образцы-свидетели. Затем отливки выдерживали при температуре второй стадии графитизации

(720—730 °С). В процессе отжига извлекали из печи через каждые 40 мин образцы-свидетели. После охлаждения контролируемую поверхность с помощью наждака очищали от загрязнений. Далее на нее устанавливали радиоизотопный датчик (см. рис. 1). При облучении поверхностного слоя контролируемого образца-свидетеля гамма-квантами радионуклидов экранировали детектор селективным фильтром, регистрируя поток характеристического К-излучения Mn (N_i^{Mn}). Далее открывали детектор (сдвигая фильтр), измеряя суммарный поток вторичного излучения ($N_i^C = N_i^{Mn} + N_i^{Fe}$). Определив отношение N_i^{Fe}/N_i^C , по калибровочной прямой (см. рис. 2) находили содержание железа, а по величине N_i^{Fe}/N_i^{Mn} , используя равенство (6), — содержание Mn и далее перлита по уравнению (7). Продолжительность определения содержания перлита в одном образце с учетом его подготовки составила 6—7 мин.

Следует отметить, что разработанный способ радиоизотопного определения содержания перлита позволяет получать данные о формировании требуемой структуры чугуна в процессе отжига. Его применение на производстве позволило подобрать оптимальное время выдержки, обеспечивающее получение износостойкой структуры. Кроме этого, предлагаемый способ снижает количество брака, а также финансовые затраты на выполнение аналитических работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гуляев А. П. Металловедение. М.: Металлургия, 1977. 647 с.
2. Мамиконян С. В. Аппаратура и методы флуоресцентного рентгенорадиометрического анализа. М.: Атомиздат, 1976. 170 с.
3. Паисов И. В. Термическая обработка стали и чугуна. М.: Металлургия, 1970. 263 с.
4. Налимов В. В. Применение математической статистики при анализе веществ. М.: Физматгиз, 1960. 385 с.

М. С. БЕЛЯКОВА, аспирант, М. Г. КОСОВ, д-р техн. наук
МГТУ "Станкин"

Моделирование поверхностей с учетом отклонений их формы и расположения, определяемых техническими требованиями

Повышенные требования к точности технологического оборудования (ТО) показали, что при ее оценке возрастает роль критерия контактной жесткости. Контактные упругие перемещения составляют значительную часть — от 40 до 90 % — в балансе упругих перемещений и их узлов. Особенно важно учитывать роль критерия контактной жесткости при оценке погрешностей закрепления в приспособлениях, где точность монтажа деталей определяется частично условиями прилегания, т. е. контактом сопрягаемых поверхностей, что в конечном счете влияет на жесткость стыка. Это ключевое положение позволяет иначе сформулировать точностную модель, положив в ее основу реальное контактное взаимодействие узлов и деталей ТО. Контактное взаимодействие узлов и деталей ТО отличается от известных решений рядом существенных особенностей. К ним относятся разнообразие расчетных схем и способов нагружения, наличие большого числа контактирующих между собой деталей различной формы, а также участие в контакте поверхностей сложного профиля, имеющих вероятностную природу.

Для прогнозирования реального состояния ТО необходимо создать математическую модель, учитывающую отклонения формы и расположения сопрягаемых поверхностей, а также собственные и контактные деформации деталей. Создание такой модели позволило бы в дальнейшем разработать конструкторско-технологические мероприятия, обеспечивающие требуемое качество ТО.

Степень приближения статистической модели к реальному образу поверхности определяется объемом априорной информации, необходимой для ее построения. Эту информацию можно охарактеризовать двумя уровнями.

1. Математическая модель привязана к конкретной технологии и определенным условиям производства, имеются прототипы поверхностей. В этом случае математическая модель поверхности может быть построена на основании экспериментальных данных.

2. Отсутствуют данные, характеризующие изготавливаемые поверхности, например при проектировании новых типов технологического оборудования.

Вся необходимая информация о рельефе определяется техническими требованиями к изготавливаемым деталям. Математическая модель поверхности строится на основании этих требований. Трудности построения имитационной модели в этом случае заключаются в том, что технические требования, определяемые стандартами, не позволяют однозначно описать техническую поверхность.

Данные об отклонениях формы и расположения поверхностей, приводимые в ГОСТ 24643—81, не позволяют однозначно определить положение моделируемой поверхности. В таблице приведены отклонения формы и расположения поверхностей и число параметров, определяемых стандартом [1]. Отклонения формы и расположения являются случайными величинами, по значению которых необходимо построить профиль поверхности. При решении этой задачи для определения отклонений формы и расположения поверхности детали вводятся дополнительно законы распределения случайных величин, необходимых для количественного описания положения поверхностей в пространстве.

Показатель	Число параметров
Отклонения формы	
От круглости	1
От цилиндричности	1
Профиля продольного сечения	1
От прямолинейности оси (линии) в пространстве	1—2
От плоскостности	1
От прямолинейности в плоскости	1
Отклонения расположения	
От параллельности плоскостей	1
От параллельности осей (прямых) в пространстве	1—2
От параллельности осей (прямых) в общей плоскости	1
Наклона	1—2
От перпендикулярности плоскостей	1—2
От соосности	1—2
От симметричности	1
От пересечения осей	1
Позиционное	1—2
Суммарные отклонения формы и расположения	
Радиальное биение	1
Полное радиальное биение	1
Торцевое биение	1
Полное торцевое биение	1
Отклонение формы заданного профиля	1
Отклонение формы заданной поверхности	1

Законы распределения случайных величин в тех случаях, когда априорная информация недостаточна, могут быть заданы на основе центральной предельной теоремы А. М. Ляпунова. Суть ее состоит в том, что если имеется достаточно большое число N независимых случайных величин, то сумма их будет подчиняться закону нормального распределения даже тогда, когда слагаемые случайные величины подчиняются ненормальному распределению. При этом предполагается, что ни одна из этих слагаемых случайных величин не доминирует над остальными, т. е. не играет преобладающей роли в образовании суммарной случайной величины.

Согласно стандарту, отклонения формы поверхностей (профилей) отсчитываются от точек реальной поверхности до прилегающей поверхности (прямой, окружности и т. д.) по нормальным к ней.

Прилегающая линия или поверхность соприкасается с реальным профилем и располагается таким образом, чтобы отклонение от нее до наиболее удаленной точки поверхности в пределах нормируемого участка имело минимальное значение.

Прилегающие поверхности, линии используются для отсчета отклонения формы и расположения, так как их положение соответствует расположению контрольных линеек.

При решении подобной задачи с помощью машинной имитации положение прилегающих поверхностей вначале неопределенно, так как реальный профиль еще не построен. Поэтому вместо прилегающей линии поверхности целесообразно рассматривать некоторый ее аналог или опорную поверхность, от которой ведется отсчет отклонения профиля [2].

Например, отклонения формы и расположения будут оцениваться по наибольшему отклонению Δ_δ , отсчитываемому от такой опорной поверхности, проведенной через верхнюю границу поля допуска так, что должно выполняться условие $\Delta_\delta \leq T_\delta$, где T_δ — допуск формы и расположения. В частности, форма $F(z_1, z_2, y)$ реальной поверхности будет моделироваться при помощи соотношения

$$F(z_1, z_2, y) = f_{0n}(z_1, z_2, y) + \Delta_\sigma, \quad (1)$$

где $f_{0n}(z_1, z_2, y)$ — математическое ожидание процесса; Δ_σ — независимая случайная величина с нормальным законом распределения.

Дисперсия σ^2 такой величины приближенно определяется по правилу "трех сигм" $3\sigma = T_\sigma$, где T_σ — половина интервала распределения величины Δ_σ .

Опорные поверхности, линии могут быть разбиты на простейшие поверхности и линии, которые описываются соответствующими математическими уравнениями. Так, для оценки отклонений формы тела вращения необходимо описать окружность, круговой цилиндр и т. д.

Для воспроизведения на ЭВМ формы реальной поверхности детали можно привести следующие ре-

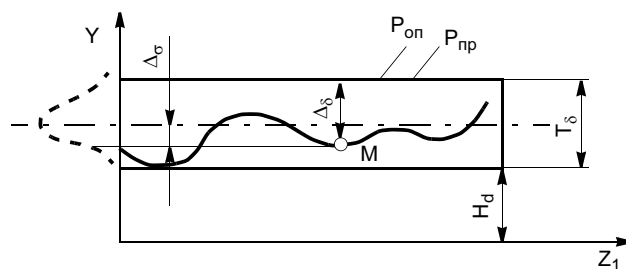


Рис. 1. Схема образования погрешности формы

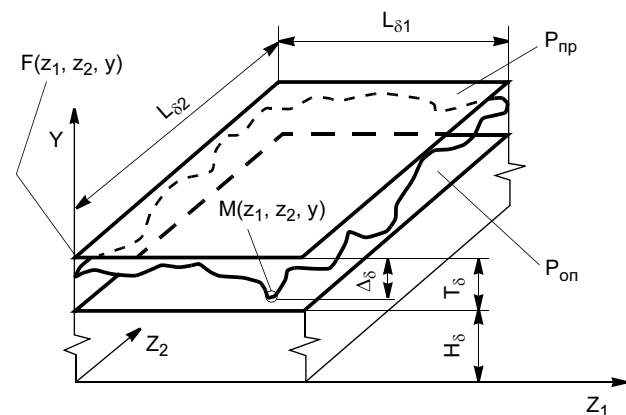


Рис. 2. Схема построения отклонения от плоскостности

комендации. Принимается, что прилегающая $P_{пр}$ и опорная $P_{оп}$ поверхности совпадают с верхней границей поля допуска (рис. 1). Отклонение формы Δ_δ для точки M со случайной координатой z_1 согласно рис. 1

$$\Delta_\delta(z_1) = T_\delta/2 - \Delta_\sigma,$$

где Δ_σ — нормально распределенная в отрезке

$\left[-\frac{T_\delta}{2}, \frac{T_\delta}{2}\right]$ случайная величина с математическим ожиданием, равным нулю. Половина T_σ отрезка рассеивания величины Δ_σ находится из условия расположения точек поверхности внутри поля T_δ допуска. Отклонение от плоскостности равно наибольшему отклонению Δ_δ , измеряемому от прилегающей плоскости P (рис. 2).

Опорные поверхности в плоскости Z_1, Z_2 покрываются сеткой с шагом $z_{\Delta 1}, z_{\Delta 2}$. В каждой точке генерируется случайная величина согласно формуле (1).

Таким образом, получены информационные модели, алгоритмы и программы по моделированию отклонений, приведенных в таблице.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Марков Н. Н., Осипов В. В., Шабалина М. Б. Нормирование точности в машиностроении / Под ред. Ю. М. Соломенцева. 2 изд., испр. и доп. М.: Высшая школа, Издательский центр "Академия", 2001. 335 с.
2. Батыров У. Д., Косов М. Г. Имитационные контактные задачи в технологии. М.: "Янус-К", 2001. 102 с.

Ф. А. ХРОМЧЕНКО, д-р техн. наук
ОАО "ВТИ"

Техническая диагностика сварных соединений трубопроводов

Ч. 1. Сварные соединения трубопроводов I категории

В последнее время введены в действие нормативно-технические документы (НТД) по проведению экспертизы промышленной безопасности при эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды, отработавших парковый ресурс. Это повысило ответственность экспертных организаций и владельцев тепловых электростанций за своевременное и четкое проведение технического диагностирования опасных промышленных объектов. Однако в части технического диагностирования сварных соединений трубопроводов у специалистов, занятых контролем металла и продлением ресурса трубопроводов, имеются известные трудности в реализации нормативных требований. В связи с этим отдельные положения технического диагностирования, касающиеся сварных соединений трубопроводов, требуют специального рассмотрения.

При решении задач технического диагностирования трубопроводов (рис. 1), согласно РД 03-484—02, предусмотрено комплексное выполнение следующих процедур:

- анализ эксплуатационной, конструкторской (проектной) и ремонтной документации;
- проведение контроля неразрушающими методами;
- определение механических характеристик;
- металлографические исследования;
- определение химического состава металла;
- оценка видов повреждений;
- испытания на прочность и другие виды испытаний;
- расчетно-аналитические процедуры оценки и прогнозирования технического состояния, включаю-

щие расчет режимов работы, установление критериев предельного состояния металла, исследование НДС и выбор критериев предельных состояний, определение остаточного срока эксплуатации (до прогнозируемого наступления предельного состояния).

По паропроводам (трубопроводам I категории групп 1—3, табл. 1) наружным диаметром 76 мм и более из теплоустойчивых низколегированных сталей 12МХ (12ХМ), 15ХМ, 12Х1МФ (12ХМФ) и 15Х1М1Ф, эксплуатируемых при температуре пара выше 450 °С и отработавших парковый ресурс, решение поставленной задачи включает комплекс организационно-технических процедур, регламентированных СО 153-34.17.470—2003.

Особое внимание при техническом диагностировании уделяется сварным соединениям, которые в силу своих особенностей относятся к категории наиболее слабых элементов в системе паропроводов и регламентируют их ресурс. К таким особенностям относятся следующие:

— неоднородность (химическая, структурная, механическая) зон металла, следствием чего является наличие в сварных соединениях различного рода хрупких и/или мягких прослоек металла, снижающих работоспособность соединений;

— геометрическая неоднородность сварных соединений, которая провоцирует действие повышенной (высокой) концентрации напряжений в зонах перехода от поверхности швов к основному металлу. На рис. 2 приведены сварные соединения различных типов. Согласно РД 10-577—03, их классифицируют как соединения типа 1 (стыки равнотолщинных труб, кон-

Таблица 1

Категория трубопроводов	Группа	Рабочие параметры среды	
		Температура, °С	Давление, МПа
I	1	Свыше 560	Не ограничено То же " " Более 8,0
	2	Свыше 520 до 560	
	3	Свыше 450 до 520	
	4	До 450	
II	1	Свыше 350 до 450	До 8,0 Более 4,0 до 8,0
	2	До 350	
III	1	Свыше 250 до 350	До 4,0 Более 1,6 до 4,0
	2	До 250	
IV		Свыше 115 до 250	Более 0,07 до 1,6

Примечание. Если значения параметров среды находятся в разных категориях, то трубопровод следует отнести к категории, соответствующей максимальному значению параметров среды.

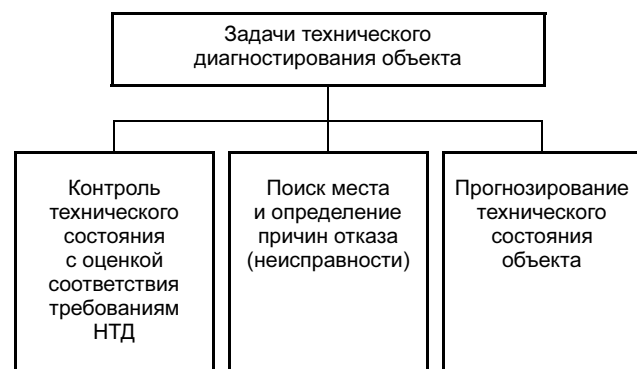


Рис. 1. Основные комплексные задачи, решаемые при техническом диагностировании элементов (сварных соединений, труб и фасонных деталей) трубопроводов

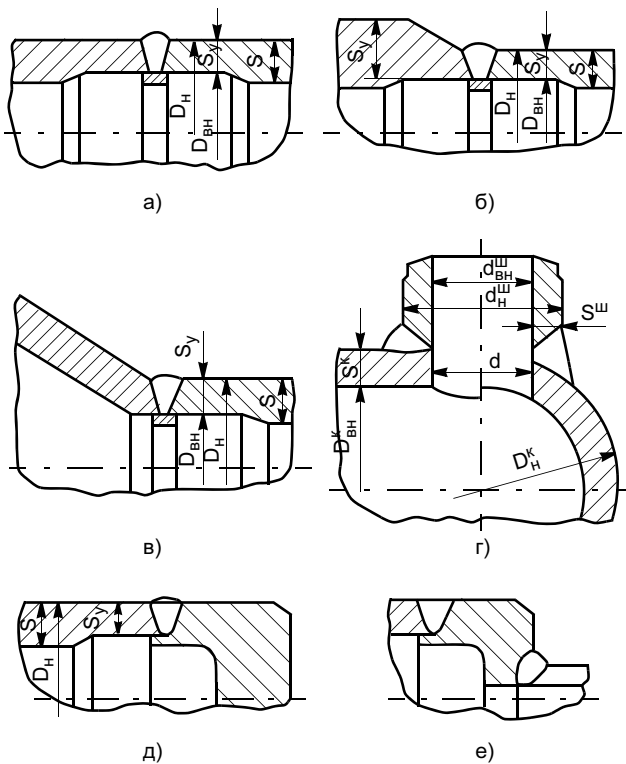


Рис. 2. Типы сварных соединений паропроводов: а — стыковое сварное соединение трубных элементов с одинаковой толщиной стенки — СССР; б — стыковое сварное соединение разнотолщинных трубных элементов — СССР_{ртз}; в — стыковое сварное соединение трубы с коническим переходом — СССР_{кл}; г — тройниковое (штуцерное) сварное соединение — ТСС (ШСС); д — стыковое сварное соединение трубы с донышком — СССР_д; е — штуцерное сварное соединение патрубка с донышком — ШСС_д

центраторы напряжений условно отсутствуют) и типа 2 (сварные соединения разнотолщинных трубных элементов с угловыми и стыковыми швами, с концентраторами напряжений). Сварные соединения типа 2 подлежат эксплуатационному контролю в увеличенных объемах из-за их повышенной чувствительности к преждевременным повреждениям. Это подтверждается результатами статистического анализа ОАО "ВТИ", из которых следует, что на долю сварных соединений типа 2 приходится около 94 % отказов, на долю соединений типа 1 — лишь 6 % общего числа повреждений (всего 1450 повреждений);

— пониженные свойства сварных соединений в сравнении с основным металлом, например, по характеристикам жаропрочности, статической и циклической трещиностойкости. Это учитывается вводом соответствующих коэффициентов снижения прочности при расчетной оценке работоспособности сварных соединений согласно РД 10-249—98 и других НТД.

При проведении технического диагностирования сварных соединений паропроводов с установлением возможности и условий продления срока их безопасной эксплуатации сверх паркового ресурса выполняется определенный комплекс работ (рис. 3).

Анализ технической документации включает ознакомление с паспортами, чертежами, схемами и другими документами, относящимися к техническому состоянию паропровода. Кроме того, анализу подлежат информация об условиях эксплуатации (проектных и фактических параметрах пара: температуре и давлении, а также накопленной длительности наработки и числу пусков-остановов энергетического оборудования: котла, турбины), а также о результатах проведенного контроля, повреждениях и ремонте сварных соединений, расчетах на прочность паропровода.

Визуальный (ВК) и приборный (измерительный) контроль выполняют для установления фактической толщины стенки трубных элементов в пришовной зоне сварных соединений (проводят с помощью ультразвуковой толщинометрии — УЗТ), фактического наружного диаметра трубных элементов в зоне сварных соединений (особенно важно для стыковых и тройниковых или штуцерных сварных соединений разнотолщинных трубных элементов) с использованием при



Рис. 3. Процедуры, выполняемые при техническом диагностировании сварных соединений паропроводов

Таблица 2

Тип сварного соединения (см. рис. 2)	Температура эксплуатации, °С	Объем контроля различными методами, %, при продлении срока службы			
		ВК, УЗК, МПД (ЦД) и УЗТ	ТВ	МАР соединений стали	
				12МХ (12ХМ), 15ХМ	15Х1М1Ф, 12Х1МФ
ССС	Менее 510	10/20	100	2 с. с.	10—20
	Не менее 510	20/30	100	2 с. с.	10—20
ССС _{ртз}	Менее 510	50/50	100	20	20—60
ССС _{кл}	Не менее 510	100/100	100	20	20—60
ССС _д , ТСС, ШСС	Не зависит от температуры	100/100	100	50	30—100
ШСС _д , ТСС	То же	100/100	100	100	30—100
Равнопроходный ШСК	—	100/100	50/100	—	50/100

Примечания: 1. Контроль неразрушающими методами в объемах, указанных в числителе, означает требование для первого обследования с продлением ресурса, а в знаменателе — для повторного обследования с вторичным продлением срока службы.

2. Контроль методом ТВ проводится для металла шва и основного металла примыкающих трубных элементов из стали 15Х1М1Ф (15Х1М1ФЛ), для соединений из стали остальных марок — только для металла шва.

3. При обнаружении недопустимых дефектов в сварных соединениях или недопустимой микроповрежденности металла зон соединений объем контроля соответствующим методом увеличивается в 2 раза, но при этом не превышает 100 %.

Обозначения: ШСК — штампосварное колено (контролю подлежат сварные соединения с продольным швом); 2 с. с. — два сварных соединения, вырезаемые из паропроводов для исследования металла.

контроле измерительного инструмента, установления фактической формы и качества наружной (при возможности и внутренней) поверхности сварных соединений при визуальном контроле с применением (при необходимости) шаблонов и измерительного инструмента.

Контроль неразрушающими методами — ультразвуковой (УЗК), цветная дефектоскопия (ЦД), магнитопорошковая дефектоскопия (МПД), измерением твердости (ТВ), металлографический анализ с помощью реплик (МАР), ультразвуковая толщинометрия (УЗТ) — выполняется для выявления фактического состояния металла и сплошности сварных соединений в объемах, требуемых СО 153-34.17.470—2003 (табл. 2 и 3). Измерение твердости металла шва и основного металла примыкающих трубных элементов из стали 15Х1М1Ф (15Х1М1ФЛ) проводится для определения возможного разупрочнения сварных швов, что в дальнейшем должно учитываться при установлении возможности продления срока службы таких соединений сверх паркового ресурса. Качество сварных соединений оценивается по нормативным требованиям РД 153-34.1-003-01 (РТМ-1с), микроповрежденность металла с оценкой остаточного ресурса сварных соединений по структурному фактору — согласно РД 153.34-1-17.467—2001. Критерии работоспособности сварных соединений паропроводов должны соответствовать требованиям, представленным в табл. 4, а качество основного металла трубных элементов — нормативным требованиям (табл. 5) согласно СО 153-34.17.470—2003.

Особая роль отводится металлографическому анализу с помощью реплик (срезом металла) или с помощью переносного микроскопа с увеличением его объемов от 10 до 100 % в зависимости от зна-

Таблица 3

Тип сварного соединения	Параметр конструкционной прочности (ПКП)	Значение ПКП для групп			Объем контроля, %, методом МАР сварных соединений из хромомолибденованадиевых сталей для групп			Место расположения сварных соединений
		1	2	3	1	2	3	
ТСС ШСС ШСС _д	S^k/S_o^k или S^w/S_o^w	1—1,2	1,2—1,5	>1,5	100	100	50	На любом участке паропровода, особенно в зоне перемычек и арматуры
	$d_o/(D_n - 2S_o^k)$	≥0,75	≥0,75	≥0,75	100	100	50	
		<0,75	<0,75	<0,75	75	75	30	
ССС _{ртз} ССС _{кл} ССС _д	S_y/S_o	≤1—1,2	1,2—1,5	≥1,5	60	40	10	То же, и вблизи неподвижных опор
ССС	S_y/S_o	≤1—1,2	1,2—1,5	≥1,5	60	15	10	Вблизи неподвижных опор — на перемычках у тройников

Примечания: 1. Для ТСС, ШСС и ШСС_д группа контроля выбирается по наименьшему значению из S^k/S_o^k и S^w/S_o^w .

2. Первоочередному контролю подлежат сварные соединения с разупрочненным металлом шва ($\gamma_{мш} < 1,0$) или имеющиеся ремонтные подварки.

Обозначения: d_o — диаметр отверстия и штуцера тройника; S_y — толщина стенки трубных элементов, утоненная расточкой в пришовной зоне; S_o^k , S_o^w , S_o — расчетная толщина стенки корпуса тройника, штуцера и трубного элемента соответственно (расчет проводится согласно РД 10-249—98).

Таблица 5

Критерии качества основного металла паропроводов из теплоустойчивых сталей на сверхпарковый ресурс согласно СО 153-34.17.470—2003	Нормативное значение
Поверхностные дефекты: раковины, риски и другие одиночные повреждения глубиной h_d , мм Трещины всех видов и ориентации	$2,0 \geq h_d \leq 10S$ Не допускаются
Остаточная деформация ползучести, %, для прямых труб из стали: 12X1МФ 15X1М1Ф То же, для прямых участков гибов из сталей этих марок Снижение механических свойств после 10^5 ч эксплуатации по сравнению с уровнем свойств, регламентированных техническими условиями на поставку паропроводных труб: прочностных свойств при 20 °С, σ_B , $\sigma_{0,2}$, МПа ударной вязкости при 20 °С, Дж/см ²	Не более 1,5 Не более 1,0 Не более 0,8 Не более 30 Не более 15
Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа: стали 12X1МФ при температуре 550 °С стали 15X1М1Ф при температуре 550 °С стали 12МХ и 15ХМ при температуре 510 °С	Не менее 180 Не менее 200 Не менее 200
Микрповрежденность структуры стали при увеличении в 500 раз Суммарное содержание всех легирующих элементов в карбидном осадке (к общему их количеству) для стали 12X1МФ и 15X1М1Ф, % Снижение длительной прочности на период 10^5 и $2 \cdot 10^5$ ч по сравнению со средним уровнем этой характеристики, регламентированным в технических условиях на трубы, % Снижение длительной пластичности на период продления срока эксплуатации, % Снижение плотности металла вблизи наружной поверхности труб по сравнению с исходным состоянием, %	Не более 4 баллов Не более 60 Не более 20 Не более 5,0 Не более 0,3
Критическая температура хрупкости, °С, стали: 12X1МФ 15X1М1Ф Вязкость разрушения хромомолибденованадиевой стали при температуре 20 °С K_{IC} , МПа · $\sqrt{м}$	Не более 60 Не более 50 65—73

Исследования структуры, химического и фазового составов, а также испытания механических свойств металла согласно СО 153-34.17.470—2003 проводятся на вырезанном из паропровода представительном трубном участке со сварным соединением, отрабатывавшим парковый ресурс.

Одновременно с этим необходимым является установление очередности проведения обследования сварных соединений при больших объемах контроля. В этом случае в соответствии с методологическим подходом, разработанным в ОАО "ВТИ", первоочередному контролю подлежат наиболее нагруженные сварные соединения, что определяется по критериям категории опасности соединений (КО) и допускаемому для них числу циклических нагружений [N^{cc}] при пусках-остановах энергетического оборудования.

Уровень КО сварных соединений устанавливается по максимальному значению составляющих — КО_{кп}, КО_{пл}, КО_{мп} — значения категории опасности сварных соединений по параметрам конструкционной прочности, запаса длительной прочности и микрповрежден-

чений параметра конструкционной прочности сварных соединений (см. табл. 3). Следует отметить, что для сварных соединений, эксплуатирующихся на паропроводах до исчерпания паркового ресурса, контроль методом металлографического анализа с помощью реплик согласно РД 10-577-003 ограничивается объемом 5—10 %.

Таблица 4

Критерий работоспособности сварных соединений коллекторов котлов и паропроводов из теплоустойчивых хромомолибденованадиевых сталей	Оптимальное значение
Прочностной	
Длительная прочность $\sigma_{д.п}^{cc}$, МПа	Не менее $[\sigma_{д.п}^{cc}]$
Коэффициент прочности φ_σ	Не менее $[\varphi_\sigma]$
Запас длительной прочности n_d	Не менее 1,0
Твердость металла шва НВ _{мш}	140—240 (250)
Упрочнение металла шва $\gamma_{мш}$ ($\gamma_{мш} = \text{HB}_{мш}/\text{HB}_{ом}$)	1,0—1,4
Разупрочнение зоны термического влияния $\xi_{рп}$, %	Не более 10
Деформационный	
Длительная пластичность $\psi_{д.пл}^{cc}$, %	Не менее 10
Критическая температура хрупкости $t_{ко}$, °С	Не более 30
Энергетический	
Удельная энергия на зарождение трещины a_3 , МДж/м ² , при температуре, °С: 20 510—560	Не менее 0,8 Не менее 0,3
Удельная энергия на развитие разрушения a_p , МДж/м ² , при температуре, °С: 20 510—560	Не менее 0,4 Не менее 0,7
Структурный	
Содержание бейнита в основном металле Б, %	Не более 90
Размер зерна микроструктуры основного металла	Не крупнее № 4
Размер зерна микроструктуры металла шва и околошовной зоны (участка перегрева при сварке)	Не крупнее № 2
Доля участков с мелким зерном № 6—8 в микроструктуре металла шва, %	Не менее 30
Толщина ферритных прослоек в микроструктуре металла шва, мкм	15—50
Микрповрежденность порами ползучести металла зон соединения (согласно РД 153-34.1-17.467—2001), стадия	II—III
Конструкционный	
Запас по толщине стенки трубных элементов в пришовной зоне соединения $K_s = S/S_0$	Не менее 1,4
Относительная разнотолщинность трубных элементов тройника в пришовной зоне $\beta^k/\beta^ш$	0,95—1,05
Конструкционная прочность корпуса тройника с одиночным отверстием $d_0/(D_n^k - 2S_{ф}^k)$	Не более 0,75
Силовой	
Вязкость разрушения при 20 °С K_{IC} , МПа · $\sqrt{м}$	Не менее 80
Вязкость разрушения при 545 °С K_{IC} , МПа · $\sqrt{м}$	Не менее 100
Пороговое значение вязкости разрушения в условиях ползучести на период $2 \cdot 10^5$ ч при 540 °С K_{IC} , МПа · $\sqrt{м}$	14

ности соответственно. Значения каждого из КО и соответственно объемы контроля определяются согласно методике ВТИ*.

Допускаемое число циклов для сварных соединений $[N^{cc}]$ согласно РД 10-249—98 определяется по условию

$$1,25\sigma_{\text{экв}}/1,5[\sigma] < 1,0.$$

При невыполнении этого условия допускаемое число пусков-остановов паропровода для сварных соединений ограничивается значением 500 циклов, при выполнении условия — более 500 циклов. Первоочередному контролю в этом случае подлежат сварные со-

единения, для которых фактическое накопленное в процессе эксплуатации число пусков-остановов паропровода превышает допустимые 500 циклов.

Расчет на прочность с оценкой ресурса сварных соединений паропроводов проводится по разработанной в ОАО "ВТИ" методике с учетом требований СО 153-34.17.470—2003 и РД 10-249—98.

Парковый ресурс $\tau_{\text{пк.р}}$ определяется из условия

$$\sigma_p = [\sigma],$$

где σ_p — приведенные напряжения от внутреннего давления; $[\sigma]$ — допускаемые напряжения на сталь согласно РД 10-249—98.

Максимальный парковый ресурс сварных соединений ограничивается значением 250 и 300 тыс. ч с учетом регламентированных, согласно РД 10-577—03, предельных сроков $\tau_{\text{пк.р}}$ коллекторов и прямых труб паропроводов соответственно.

Индивидуальный ресурс $\tau_{\text{и.р}}$ сварных соединений, согласно СО 153-34.17.470—2003, устанавливается из условия

$$\tau_{\text{и.р}} = \tau_{\text{пк.р}} + [\tau_{\text{п.р}}],$$

где $[\tau_{\text{п.р}}]$ — допускаемый продленный срок службы 50 тыс. ч.

Для установленного срока $\tau_{\text{и.р}}$ сварных соединений проверяется выполнение условия

$$\sigma_{\text{экв}} \leq 1,5[\sigma] = \sigma_{\text{д.п}},$$

где $\sigma_{\text{экв}}$ — эквивалентные напряжения от действия всех нагружающих факторов (внутреннего давления, весовых нагрузок и самокомпенсации от тепловых расширений); $\sigma_{\text{д.п}}$ — длительная прочность стали.

Предельный ресурс устанавливается как частный случай индивидуального ресурса по условию

$$\sigma_{\text{экв}} = 1,5[\sigma].$$

Остаточный срок службы для сварных соединений

$$\tau_{\text{о.р}} = \tau_{\text{и.р}} - \tau_{\text{н}},$$

где $\tau_{\text{н}}$ — длительность наработки.

Схемы вариантов оценки сроков остаточного ресурса с учетом длительности наработки сварных соединений приведены на рис. 4. Применение таких схем оценки остаточного ресурса правомерно в случаях, когда сварные соединения идентичного типоразмера имеют различную наработку на одном паропроводе.

Полученные результаты технического диагностирования обобщаются и анализируются в экспертном заключении, в котором излагается установленное техническое состояние сварных соединений паропровода с оценкой их остаточного срока службы, обоснованием регламента эксплуатационного контроля и мер по продлению ресурса.

Для паропроводов из углеродистых сталей (трубопроводов категории I группы 4) с температурой эксплуатации до 450 °С техническое диагностирование проводится аналогичным образом с учетом обеспечения требуемого качества и работоспособности сварных соединений по допускаемым дефектам и эксплуатационной повреждаемости вследствие графитизации, усталости и ползучести.

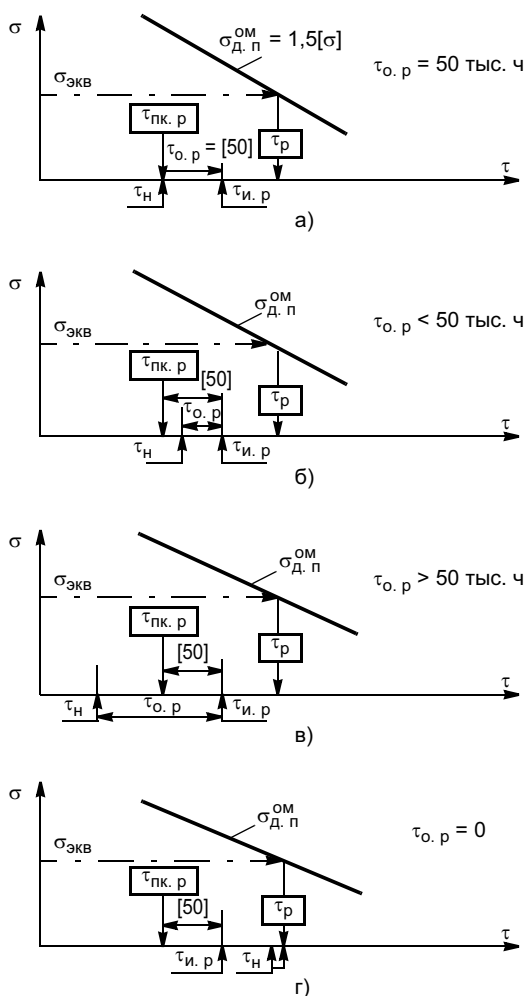


Рис. 4. Варианты схем определения остаточного срока службы сварных соединений паропроводов из хромомолибденованадиевых и хромомолибденовых сталей: а — при эксплуатационной наработке (ЭН) на период истощения паркового ресурса (остаточный ресурс соответствует допускаемому СО 153-34.17.470—2003 сроку 50 тыс. ч); б — при ЭН, превысившей парковый ресурс и не исчерпавшей допускаемый срок продления 50 тыс. ч; в — при ЭН, не исчерпавшей парковый ресурс; г — при ЭН, превысившей допускаемый срок продления 50 тыс. ч после истощения паркового ресурса и достигшей предельного ресурса

*Хромченко Ф. А., Калугин Р. Н. Эксплуатационный контроль сварных соединений паропроводов // Энергетик. 2004. № 11.

Единая система защиты от коррозии и старения МЕЖОПЕРАЦИОННАЯ ПРОТИВОКОРРОЗИОННАЯ ЗАЩИТА Общие требования (ГОСТ Р 9.518—2006)

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ "О техническом регулировании", а правила применения национальных стандартов Российской Федерации — ГОСТ Р 1.0—2004 "Стандартизация в Российской Федерации. Основные положения".

Стандарт разработан и внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 214 "Защита изделий и материалов от коррозии" (ООО "Протектор"). Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 31 октября 2006 г. № 233-ст. Введен впервые.
Дата введения 2008—01—01.

1. Область применения

Настоящий стандарт устанавливает общие требования к защите от коррозии металлических заготовок из полуфабрикатов, деталей и сборочных единиц (далее — изделия) в процессе их изготовления (далее — межоперационная защита) и межоперационного хранения на срок не более одного года.

2. Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 9.517—2003 "Единая система защиты от коррозии и старения. Временная противокоррозионная защита изделий. Методы испытаний";

ГОСТ Р 12.4.013—97 "Система стандартов безопасности труда. Очки защитные. Общие технические условия";

ГОСТ Р 12.4.026—2001 "Система стандартов безопасности труда. Цвета сигнальные, знаки безопасности и разметка сигнальная. Назначение и правила применения. Общие технические требования и характеристики. Методы испытаний";

ГОСТ Р 50558—93 "Промышленная чистота. Жидкости смазочно-охлаждающие. Общие технические требования";

ГОСТ 3.1603—91 "Единая система технологической документации. Правила оформления документов на технологические процессы (операции) сбора и сдачи технологических отходов";

ГОСТ 9.014—78 "Единая система защиты от коррозии и старения. Временная противокоррозионная защита изделий. Общие требования";

ГОСТ 9.032—74 "Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы, технические требования и обозначения";

ГОСТ 9.054—75 "Единая система защиты от коррозии и старения. Консервационные масла, смазки и ингибированные пленкообразующие нефтяные составы. Методы ускоренных испытаний защитной способности";

ГОСТ 9.085—78 "Единая система защиты от коррозии и старения. Жидкости смазочно-охлаждающие. Методы испытаний на биостойкость";

ГОСТ 9.102—91 "Единая система защиты от коррозии и старения. Воздействие биологических факторов на технические объекты. Термины и определения";

ГОСТ 9.103—78 "Единая система защиты от коррозии и старения. Временная противокоррозионная защита металлов и изделий. Термины и определения";

ГОСТ 9.301—86 "Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Общие требования";

ГОСТ 9.305—84 "Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Операции технологических процессов получения покрытий";

ГОСТ 9.311—87 "Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия металлические и неметаллические неорганические. Метод оценки коррозионных поражений";

ГОСТ 9.402—2005 "Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей к окрашиванию";

ГОСТ 9.504—85 "Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Метод определения защитной способности упаковочных материалов на бумажной основе";

ГОСТ 9.509—89 "Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты. Методы определения защитной способности";

ГОСТ 9.508—89 "Единая система защиты от коррозии и старения. Средства временной противокоррозионной защиты металлов. Методы определения защитной способности при воздействии пота рук";

ГОСТ 9.510—93 "Единая система защиты от коррозии и старения. Полуфабрикаты из алюминия и алюминиевых сплавов. Общие требования к временной противокоррозионной защите, упаковке, транспортированию и хранению";

ГОСТ 9.511—93 "Единая система защиты от коррозии и старения. Полуфабрикаты из магниевых сплавов. Общие требования к временной противокоррозионной защите, упаковке, транспортированию и хранению";

ГОСТ 12.0.004—90 "Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда. Общие положения";

ГОСТ 12.1.005—88 "Система стандартов безопасности труда. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны";

ГОСТ 12.1.016—79 "Система стандартов безопасности труда. Воздух рабочей зоны. Требования к методикам измерения концентраций вредных веществ";

ГОСТ 12.3.002—75 "Система стандартов безопасности труда. Процессы производственные. Общие требования безопасности";

ГОСТ 12.3.025—80 "Система стандартов безопасности труда. Обработка металлов резанием. Требования безопасности";

ГОСТ 12.4.009—83 "Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание";

ГОСТ 12.4.020—82 "Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты рук. Номенклатура показателей качества";

ГОСТ 12.4.028—76 "Система стандартов безопасности труда. Респираторы ШБ-1 "Лепесток". Технические условия";

ГОСТ 12.4.068—79 "Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты дерматологические. Классификация и общие требования";

ГОСТ 17.2.3.02—78 "Охрана природы. Атмосфера. Правила установления допустимых выбросов вредных веществ промышленными предприятиями";

ГОСТ 17.5.1.03—86 "Охрана природы. Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель";

ГОСТ 5272—68 "Коррозия металлов. Термины";

ГОСТ 6243—75 "Эмульсолы и пасты. Методы испытаний";

ГОСТ 15150—69 "Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды";

ГОСТ 23216—78 "Изделия электротехнические. Хранение, транспортирование, временная противокоррозионная защита, упаковка. Общие требования и методы испытаний";

ГОСТ 24927—81 "Изделия электронной техники. Общие требования к временной противокоррозионной защите и методы испытаний";

ГОСТ 27597—88 "Изделия электронной техники. Метод оценки коррозионной стойкости".

3. Термины и определения

3.1. В настоящем стандарте применены термины и определения по ГОСТ 5272, 9.102 и 9.103.

4. Общие положения

4.1. Изделия подлежат межоперационной защите в процессе их обработки, а также в перерывах между операциями обработки, при транспортировании и межоперационном хранении, если продолжительность перерывов обработки (транспортирования или хранения) изделий превышает допустимую длительность хранения без средств защиты, установленную настоящим стандартом.

4.2. Межоперационную защиту проводят в условиях, исключающих попадание атмосферных осадков и образование конденсата на поверхностях изделия, при соблюдении требований стандартов и других нормативных документов (далее НД) к температуре и относительной влажности применения средства межоперационной защиты конкретной марки.

4.3. При межоперационном хранении и транспортировании изделий предусматривают защиту от загрязнений и механических повреждений, при этом при хранении и транспортировании вне помещений (на открытом воздухе) и от атмосферных осадков.

4.4. При межоперационном хранении изделия укладывают в тару или на стеллажи, или на столы.

Не допускается укладывать изделия на пол без тары (поддонов и т. п.).

Требования к размещению крупногабаритных изделий на межоперационное хранение — по технической документации, утвержденной в установленном порядке.

4.5. Не допускается принимать на межоперационное хранение в цеховые склады и склады предприятия изделия с повреждениями лакокрасочных и металлических и неметаллических неорганических покрытий.

Примечание. Повреждения лакокрасочных покрытий — по ГОСТ 9.032, металлических и неметаллических покрытий — по ГОСТ 9.301, коррозионные поражения — по ГОСТ 9.311, 9.402, 27597.

4.6. Допустимая длительность межоперационного хранения без средств межоперационной защиты изделий из черных металлов или сочетаний их с цветными металлами (местное покрытие, пайка, сварка и т. п.) в условиях отапливаемого помещения по ГОСТ 15150 приведена в таблице.

Материал	Операция обработки изделия	Допустимая длительность хранения, ч, не более
Сталь (кроме коррозионно-стойких сталей)	Струйная, металлорежущим инструментом, холодная штамповка	4
	Абразивным инструментом	6
	Фосфатирование, оксидирование	24
Чугун	Струйная	1
	Металлорежущим инструментом, холодная штамповка	2
	Абразивным инструментом	3

Примечание. После травления, электрохимической обработки, виброабразивной, влажной абразивной струйной очистки, химического клеймения, обработки в солевых ваннах и других подобных операций необходима немедленная защита от коррозии.

Допустимую длительность межоперационного хранения изделий из черных металлов без средств межоперационной защиты для других операций обработки (см. таблицу) и других условий хранения (см. ГОСТ 15150) определяют отсутствием коррозии (балл 10) по ГОСТ 9.311 или 27597 и указывают в НД на конкретный технологический процесс и (или) в конструкторской (технологической) документации (далее техническая документация).

В технически обоснованных случаях (например, применение преобразователей ржавчины, нанесение термодиффузионных покрытий и т. п.) допускается межоперационное хранение изделий из черных металлов до коррозионного состояния металлической поверхности, оцениваемого меньшими баллами, что указывают в НД на конкретный технологический процесс противокоррозионной защиты и (или) в технической документации.

При проведении операций подготовки поверхности под окрашивание допустимую длительность межоперационного хранения устанавливают с учетом требований ГОСТ 9.402.

4.7. Допустимую длительность межоперационного хранения без средств межоперационной защиты изделий из цветных металлов, а также изделий с металлическими и неметаллическими неорганическими покрытиями устанавливают в каждом конкретном случае в соответствии с требованиями к состоянию поверхности с учетом п. 4.5 и указывают в технической документации.

4.8. Допустимую длительность межоперационного хранения без средств защиты изделий, состоящих из сочетания черных и цветных металлов, устанавливают в соответствии с требованиями к черным металлам (см. п. 4.6).

4.9. Изделия, изготовленные из коррозионно-стойких металлов, допускается не подвергать межоперационной защите.

5. Средства межоперационной защиты

5.1. Средства межоперационной защиты изделий выбирают в зависимости от металла, вида обработки поверхности, конструктивных особенностей (формы, габаритных размеров, наличия щелей и зазоров и т. п.), последующей стадии технологического процесса изготовления и требуемой длительности межоперационного хранения.

5.2. Средства межоперационной защиты должны соответствовать требованиям НД на них, иметь санитарно-эпидемиологическое заключение, обеспечивать защиту от коррозии на установленный срок.

5.3. Для межоперационной защиты применяют следующие типы средств:

- охлаждающие и смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ);
- консервационные и рабоче-консервационные масла;
- защитные атмосферы (статическое и динамическое осушение воздуха, инертные атмосферы и т. п.);

- ингибиторы атмосферной коррозии (водные растворы ингибиторов коррозии, противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки и т. п.);
- пленкообразующие ингибированные составы;
- защитные водовытесняющие составы (ЗВВС).

Примечания:

1. Для межоперационной защиты изделий из магниевых сплавов используют методы пассивирования, оксидирования, анодного окисления, фторирования по технической документации.

2. Допускается применять рабочие масла, отвечающие требованиям п. 5.2.

3. Не допускается защита охлаждающими и смазочно-охлаждающими жидкостями изделий из цветных металлов (кроме защиты минеральными маслами).

5.4. Для межоперационной защиты могут применяться средства защиты по ГОСТ 9.014 и других НД на временную противокоррозионную защиту (например, ГОСТ 9.510, 9.511, 23216 и 24927).

Охлаждающие и смазочно-охлаждающие жидкости применяют с учетом требований ГОСТ Р 50558, 6243 и требований ГОСТ 12.3.025 к их составу.

5.5. Допускается применять не предусмотренные настоящим стандартом средства межоперационной защиты, отвечающие требованиям п. 5.2 и прошедшие испытания на защитную способность (коррозионную агрессивность).

Испытания проводят в лабораториях предприятия-изготовителя, прошедших оценку состояния измерений, и (или) испытательных лабораториях (центрах), аккредитованных в установленном порядке.

5.6. Оценка защитной способности средств межоперационной защиты от коррозионного воздействия пота рук при необходимости проводят по ГОСТ 9.508 и других НД на конкретное средство защиты (изделие конкретного типа).

5.7. При наличии окрашенных поверхностей применение средств межоперационной защиты проводят после оценки возможного влияния средств защиты на лакокрасочные покрытия по ГОСТ Р 9.517.

5.8. Оценка способности средств межоперационной защиты к проникновению в щели (зазоры, стыки и т. п.) изделий проводят при необходимости по ГОСТ Р 9.517.

5.9. При применении средств межоперационной защиты на водной основе (водосмешиваемых), включая их использование в централизованных системах подачи технологических жидкостей, проводят контроль их биостойкости по ГОСТ 9.085 с учетом требований ГОСТ Р 50558 и 12.3.025.

5.10. При упаковывании изделий без применения средств межоперационной защиты упаковочные материалы на бумажной основе (кроме указанных в ГОСТ 9.014) испытывают на коррозионную агрессивность по ГОСТ Р 9.517 или на их защитную способность по ГОСТ 9.504.

5.11. Длительность защиты для конкретных марок средств межоперационной защиты устанавливают с учетом сроков защиты по ГОСТ 9.014 (разделы 7 и 3) и других НД на временную противокоррозионную защиту (например, ГОСТ 9.510, 9.511, 23216, 24927) и указывают в технической документации.

Длительность защиты для средств, не приведенных в ГОСТ 9.014, 9.510, 9.511, 23216, 24927 и другой НД на временную противокоррозионную защиту, устанавливаются в технической документации на основе сроков защиты, указанных в НД на конкретную марку средства защиты и подтвержденных испытаниями защитной способности по ГОСТ 9.509, 9.054, 9.504 в зависимости от типа средства защиты. Испытания проводят в лабораториях предприятия-изготовителя, прошедших оценку состояния измерений, и (или) испытательных лабораториях (центрах), аккредитованных в установленном порядке.

5.12. Применение средств межоперационной защиты для конкретных групп изделий (см. приложение А) в зависимости от последующей операции технологического процесса приведено в приложении Б.

Межоперационную защиту проводят в соответствии с требованиями, установленными в технической документации с учетом применяемого оборудования и НД на конкретное средство защиты, при этом в общем случае применяют:

— СОЖ поливом при механической обработке, при этом предпочтительным является применение СОЖ, предохраняющих обрабатываемый металл (кроме цветных металлов) от водородного охрупчивания;

— ингибиторы атмосферной коррозии, защитные атмосферы, пленкообразующие ингибированные составы, защитные водовытесняющие составы, консервационные и рабоче-консервационные масла — по ГОСТ 9.014 в зависимости от конкретного варианта временной защиты и НД на конкретное средство защиты.

5.13. Периодичность и методы контроля качества средств межоперационной защиты устанавливают в технической документации в зависимости от сменности работы и загрузки оборудования, типа средства межоперационной защиты с учетом требований ГОСТ Р 50558, 12.3.025, при этом контроль биостойкости средств защиты при их использовании в централизованных системах подачи технологических жидкостей проводят не реже 1 раза в неделю.

6. Способы удаления средств межоперационной защиты

6.1. Удаление средств межоперационной защиты (далее расконсервация) проводят при использовании изделий в дальнейшем технологическом процессе, а также по истечении установленной в технической документации длительности защиты.

6.2. Способы расконсервации выбирают по ГОСТ 9.014 (приложение 1 или раздел 8) с учетом НД на конкретное средство межоперационной защиты. Для поверхностей изделий, защищенных маслами, СОЖ, ЗВВС, водными ингибированными составами, допускается использовать средства и методы, применяемые для подготовки поверхности под окрашивание по ГОСТ 9.402 или под нанесение металлических и неметаллических неорганических покрытий по ГОСТ 9.305.

6.3. Изделия, защищенные маслами, эмульсиями, ЗВВС и пленкообразующими ингибированными соста-

вами, допускается использовать без расконсервации, если эти средства защиты не мешают последующей операции обработки изделий.

6.4. Методы контроля полноты удаления средств межоперационной защиты (СОЖ, консервационных и рабоче-консервационных масел, ЗВВС, пленкообразующих составов и т. п.) устанавливают в технической документации с учетом требований ГОСТ 9.402, 9.305 и НД на конкретные марки средств защиты и последующих операций обработки изделий.

7. Требования при проведении работ по межоперационной защите

7.1. При проведении работ с использованием смазочно-охлаждающих жидкостей соблюдают требования к приготовлению, хранению и применению технологических жидкостей, производственному оборудованию, отоплению и вентиляции, мерам и средствам защиты, установленные в ГОСТ 12.3.025.

Работы с применением ингибиторов коррозии (в том числе защитных атмосфер), консервационных масел с присадками (ингибиторами), пленкообразующих ингибированных составов, защитных водовытесняющих составов, противокоррозионных бумаг и ингибированных полиэтиленовых пленок проводят с соблюдением установленных требований.

Все применяемые материалы должны иметь санитарно-эпидемиологическое заключение.

7.2. Работы по межоперационной защите проводят в соответствии с требованиями ГОСТ 12.3.002, а при совмещении межоперационной защиты со стадиями технологического процесса — требованиями для конкретного технологического процесса, установленными в соответствующих стандартах Системы стандартов безопасности труда.

В операционных картах технологического процесса указывают средства индивидуальной защиты (защитные приспособления, одежду, обувь, очки и т. д.) и коллективной защиты.

7.3. Средства межоперационной защиты, содержащие токсичные вещества, хранят в запирающихся шкафах, упаковке или герметически закрытой таре, а противокоррозионную бумагу и ингибированную полиэтиленовую пленку — в рулонах, завернутых в парафинированную бумагу или полиэтиленовую пленку.

7.4. Отходы средств межоперационной защиты необходимо убирать в раскрывающиеся ящики для утилизации.

7.5. Хранение растворителей в цехе допускается в герметически закрытой таре и количестве, не более суточной потребности.

7.6. Общие санитарно-гигиенические требования к показателям микроклимата и допустимому содержанию вредных веществ в воздухе рабочей зоны помещений — по ГОСТ 12.1.005. Контроль воздуха рабочей зоны — по ГОСТ 12.1.016.

В местах возможного поступления паров химических веществ в воздух рабочей зоны предусматривают вытяжные устройства.

7.7. Персонал, работающий со смазочно-охлаждающими жидкостями, летучими ингибиторами коррозии, консервационными и рабоче-консервационными маслами, противокоррозионными бумагами, ингибированными полиэтиленовыми пленками и другими ингибированными материалами, а также органическими растворителями, проходит обучение в соответствии с требованиями ГОСТ 12.0.004.

7.8. Персонал, работающий со средствами межоперационной защиты, обеспечивают спецодеждой, спецобувью и средствами индивидуальной защиты. Для защиты кожи рук используют защитные перчатки и дерматологические средства индивидуальной защиты по ГОСТ 12.4.020 и 12.4.068, для защиты глаз — защитные очки по ГОСТ Р 12.4.013, для защиты органов дыхания — адсорбирующий респиратор марки "А" по ГОСТ 12.4.028.

7.9. Места проведения работ по межоперационной защите и расконсервации оборудуют средствами пожаротушения по ГОСТ 12.4.009 и знаками безопасности по ГОСТ Р 12.4.026.

7.10. Требования к обезвреживанию отходов производства

7.10.1. Межоперационную защиту организуют и выполняют таким образом, чтобы она не сопровождалась загрязнением окружающей среды свыше предельно допустимых норм, установленных соответствующими НД.

7.10.2. Сброс сточных вод, содержащих средства межоперационной защиты и другие химические вещества, используемые при межоперационной защите, проводят с соблюдением требований к качеству сбрасываемой воды в соответствии с требованиями Сан-ПиН 2.1.5.980—2000 и 42-121-4130—86 и дополнений к ним, утвержденных органами здравоохранения.

7.10.3. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе населенных мест — по действующим санитарным нормам, утвержденным органами здравоохранения. Контроль содержания предельно допустимых выбросов (ПДВ) в атмосферу — по ГОСТ 17.2.3.02.

7.10.4. При проведении работ по межоперационной защите необходимо обеспечивать защиту почвы от загрязнений средствами межоперационной защиты и другими используемыми веществами в соответствии с требованиями ГОСТ 17.5.1.03.

7.10.5. Утилизацию отходов проводят в соответствии с порядком накопления, транспортирования, обезвреживания и захоронения токсичных промышленных отходов, установленным в технической документации с учетом ГОСТ 3.1603, не допускающим превышения предельного количества накопления токсичных промышленных отходов на территории предприятия, в соответствии с санитарными нормами и правилами охраны окружающей среды от отходов производства.

ПРИЛОЖЕНИЕ А (справочное)

Классификация изделий для межоперационной защиты

Группа изделий	Характеристика особенности группы
I	Детали из чугуна, углеродистой и низколегированной стали после дробеструйной, гидропескоструйной обработки, после травления с высокой коррозионной активностью поверхности, подлежащей целиком или частично дальнейшей механической обработке
II	Детали из чугуна, углеродистой и низколегированной стали с частично обработанными поверхностями, подлежащие защите на весь период до сборки изделия
III	Детали из чугуна, углеродистой и низколегированной стали, окончательно обработанные, имеющие участки поверхности с различной степенью обработки (от литевой корки до зеркальной поверхности) и подлежащие защите до контрольных операций, операций сборки или нанесения постоянных защитных покрытий
IV	Сборочные единицы из углеродистой и низколегированной стали или чугуна, имеющие окончательно обработанные неподвижные детали, соединенные сваркой, клепкой или плотными разъемными соединениями
V	Сборочные единицы из углеродистой и низколегированной стали и чугуна, имеющие окончательно обработанные детали, связанные между собой хотя бы частично подвижными соединениями
VI	Сборочные единицы из черных и цветных металлов, имеющие окончательно обработанные неподвижные детали, соединенные сваркой, клепкой или плотными разъемными соединениями
VII	Сборочные единицы из черных и цветных металлов, имеющие окончательно обработанные детали, связанные между собой хотя бы частично подвижными соединениями
VIII	Детали из чугуна и углеродистой и низколегированной стали, часть поверхности которых имеет постоянные лакокрасочные покрытия или полимерные изоляционные материалы
XI	Сборочные единицы с неподвижными деталями, полностью или частично окрашенными, или имеющие полимерные материалы: — сборочные единицы из чугуна, углеродистой и низколегированной стали; — сборочные единицы из черных и цветных металлов и легированных сталей
X	Сборочные единицы с подвижными деталями, полностью или частично окрашенными, или имеющие полимерные материалы: — сборочные единицы из чугуна, углеродистой и низколегированной стали; — сборочные единицы из черных и цветных металлов и легированных сталей
XI	Детали из чугуна, углеродистой и низколегированной стали, окончательно обработанные, имеющие на части поверхности металлические и неметаллические неорганические покрытия

Группа изделий	Характеристика особенности группы
XII	Заготовки из полуфабрикатов, детали и сборочные единицы, полностью изготовленные из цветных металлов (меди и ее сплавов, алюминия и его сплавов, никеля и его сплавов, титана и его сплавов и др.), легированных сталей и детали и сборочные единицы, полностью защищенные металлическими покрытиями
XIII	Заготовки из полуфабрикатов, детали и сборочные единицы, изготовленные из магниевых сплавов
XIV	Заготовки из полуфабрикатов черных металлов (листы, профили, трубы, заготовки для судокорпусных конструкций), подлежащие дальнейшим механическим операциям (клепке, сварке, штамповке и т. п.)

ПРИЛОЖЕНИЕ Б
(рекомендуемое)
Средства межоперационной защиты, рекомендуемые к применению перед технологическими операциями производства

Группа изделий (см. приложение А)	Обработка металло-режущим инструментом	Контрольные операции	Хранение до сборки изделия	Сборка изделия
I	Охлаждающие и смазочно-охлаждающие жидкости; водные растворы ингибиторов коррозии	—	—	—
II		Водные растворы ингибиторов коррозии, противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы	—	—
III, IV, VI	—	То же	Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы, консервационные и рабоче-консервационные масла, ингибированные полимерные покрытия	Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы, консервационные и рабоче-консервационные масла, защитные водовытесняющие составы
V, VII	—	Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы	Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы, консервационные и рабоче-консервационные масла	Защитные атмосферы, водные растворы ингибиторов коррозии, консервационные и рабоче-консервационные масла
VIII, IX	—		Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы, ингибированные полимерные покрытия	Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы, консервационные и рабоче-консервационные масла, защитные водовытесняющие составы
X	—		Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы, консервационные и рабоче-консервационные масла	
XI	—		Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, защитные атмосферы, консервационные и рабоче-консервационные масла, ингибированные полимерные покрытия	Водные растворы ингибиторов коррозии, защитные атмосферы, консервационные и рабоче-консервационные масла
XII	В зависимости от требований к состоянию поверхности			
XIII	Пассивирование	Оксидирование, анодное окисление, фторирование		
XIV	—	Противокоррозионные бумаги, ингибированные полиэтиленовые пленки, консервационные и рабоче-консервационные масла, ингибированные полимерные покрытия		
Примечания: 1. Электрические контакты в изделии защищают только противокоррозионными бумагами или защитными атмосферами. 2. При необходимости проведения механических операций для сборочных единиц IV и VI групп допускается применять средства межоперационной защиты, установленные для изделий I и II групп (кроме применения охлаждающих жидкостей для сборочных единиц VI группы).				

Ссылка на данный материал как официальный документ не разрешается

О. Е. КАПУСТИН, д-р техн. наук
(РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина),
Е. М. ВЫШЕМИРСКИЙ, инж.
(ОАО "Газпром"),
С. П. СЕВОСТЬЯНОВ, инж.
(ООО "Тюментрансгаз")

Повышение безопасности и качества процессов газовой резки и сварки в системе предприятий ОАО "Газпром"

Постановлениями Ростехнадзора России № 101—103 от 19.06.2003 г. утверждены три межотраслевых нормативных документа по вопросам промышленной безопасности, определяющие порядок применения соответственно сварочных материалов, оборудования и технологий при изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции технических устройств для опасных производственных объектов: РД03-613—03, РД03-614—03, РД03-615—03.

Приложением № 1 к Рекомендациям по использованию данных нормативных документов, выпущенным в 2006 г. [1], определен по согласованию с Ростехнадзором России (№ 09-38/734 от 31.03.2006 г.) Перечень групп технических устройств опасных технических объектов, сварка (наплавка) которых осуществляется аттестованными сварщиками с применением аттестованных материалов, оборудования и технологий сварки (наплавки).

В группу нефтегазодобывающего оборудования (НГДО) входят промысловые и магистральные газопроводы и конденсатопроводы, трубопроводы для транспортировки товарной продукции, импульсного, топливного и пускового газа в пределах: установок комплексной подготовки газа (УКПГ), компрессорных станций (КС), дожимных компрессорных станций (ДКС), станций подземного хранения газа (СПХГ), газораспределительных станций (ГРС), узлов за-

мера расхода газа (УЗРГ) и пунктов редуцирования газа (ПРГ), находящихся в эксплуатации ОАО "Газпром".

При изготовлении, монтаже, ремонте и реконструкции НГДО широко применяются сварочные технологии, в том числе технологии газовой резки и сварки.

Стандартом ОАО "Газпром" [2], определяющим порядок экспертизы технических условий на оборудование и материалы, аттестации технологии и оценки готовности организаций к выполнению работ по диагностике и ремонту объектов транспорта газа ОАО "Газпром", установлены номенклатура (виды) оборудования, материалов и технологий и утверждены головные экспертные организации по каждому виду оборудования, материалов и технологий.

Головной экспертной организацией по оборудованию газовой резки и сварки, а также по технологиям разделительной резки трубопроводов утвержден МЦ "ВНИИАвтогенмаш". Стандарт ОАО "Газпром" введен в действие с 24.07.2006 г.

Учитывая, что многочисленные объекты ОАО "Газпром" расположены на обширной территории от северных границ России до западных и южных, при реализации технологий резки и сварки используется более 6 тыс. единиц сварочного оборудования, задействовано несколько десятков тысяч сварщиков, резчиков и

обслуживающего персонала, а добываемый, транспортируемый, потребляемый газ и газы, используемые при газопламенной обработке металлов, являются взрывоопасными, вопросы обеспечения безопасности при производстве газорезательных и газосварочных работ становятся наиболее важными, имеющими большое социальное значение, влияющими на качество и надежность промышленных объектов.

Работы по обеспечению качества газорезательных и газосварочных работ и повышению безопасности при их выполнении на объектах ОАО "Газпром" включают:

- обучение и аттестацию сварщиков, резчиков и руководящего персонала согласно правилам, утвержденным Ростехнадзором России и введенным в действие с 15.01.2000 г.;

- сертификацию сварочного оборудования, подлежащего обязательной сертификации, но еще не сертифицированного;

- учет, анализ и своевременную замену разнотипного и устаревшего оборудования на более совершенное, отвечающее установленным нормам и требованиям ОАО "Газпром";

- аттестацию оборудования, материалов и технологий согласно требованиям САСв — системы аттестации сварочного производства НАКС;

- разработку и внедрение стандартов предприятия, в т. ч. ин-

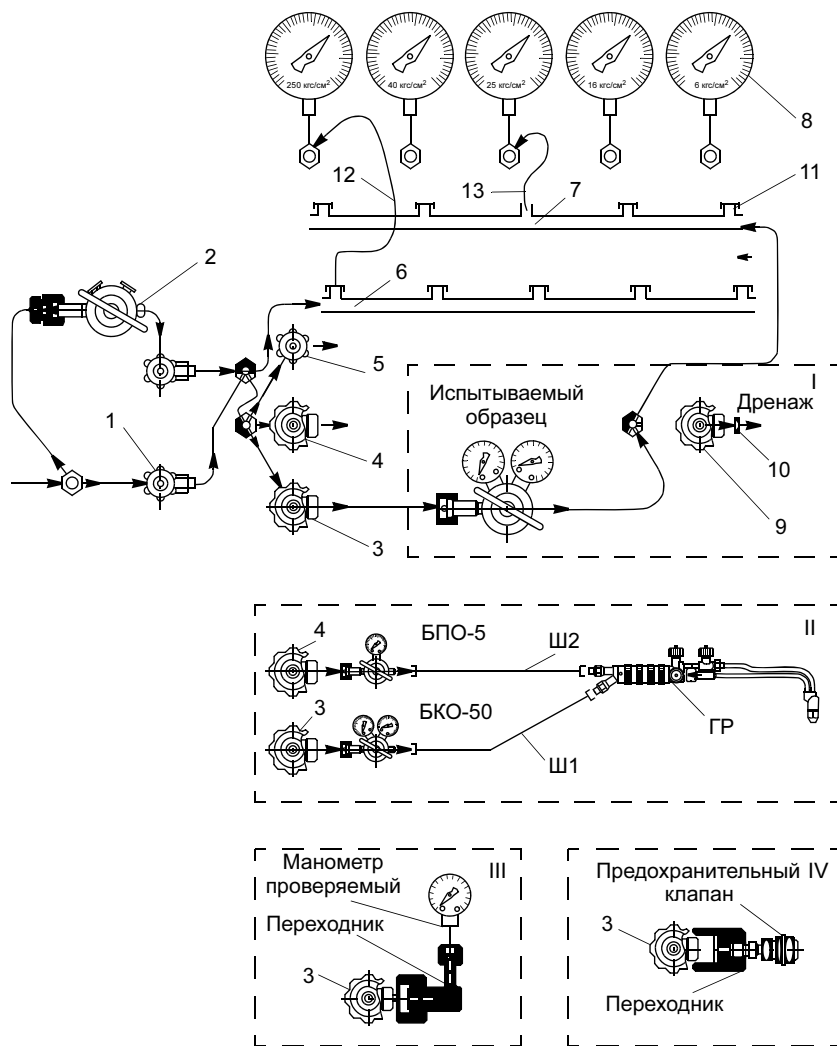


Рис. 1. Принципиальная схема универсального стенда для испытания газовых редукторов (I); горелок и резаков (II); поверки манометров (III); регулирования предохранительных клапанов (IV) (Ш1 и Ш2 — рукава газовые; ГР — горелка, резак; БПО-5, БКО-50 — редукторы): 1 — вентиль КС7104; 2 — редуктор высокого давления РВ-90; 3—5 — вентиль для присоединения кислородного, пропанового (водородного) и ацетиленового редуктора соответственно; 6, 7 — коллектор манометров входного (высокого) и выходного (рабочего) давления соответственно; 8 — манометры; 9 — вентиль дренажный; 10 — комплект расходных шайб; 11 — заглушки коллектора входного и рабочего давления соответственно; 12, 13 — соединительная трубка коллектора входного и выходного (рабочего) давления соответственно

струкций по разделительной резке и газовой сварке и др.;

— периодический и входной контроль оборудования и материалов перед передачей их на рабочие участки.

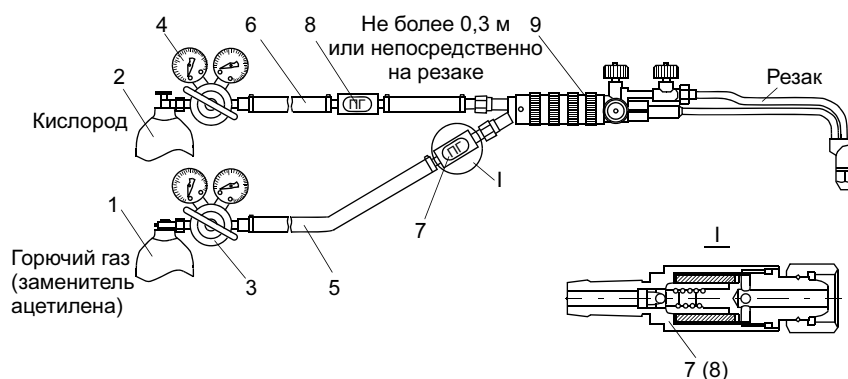
Среди дочерних предприятий ОАО «Газпром», осуществляющих планомерные работы по ремонту магистральных газопроводов, в т. ч. по газовой резке и сварке, ООО «Тюментрансгаз» одним из первых в 2004 г. установило на своих объектах специальные стенды, спроектированные и изготовленные МЦ «ВНИИАвтогенмаш», предназначенные для испытаний газовых баллонных редукторов, резаков, горелок, предохранительных клапанов и поверки манометров.

Принципиальная схема универсального стенда приведена на рис. 1.

Применение стендов позволяет выявить возможные дефекты новых горелок, резаков, редукторов, клапанов и проводить их периодические испытания согласно установленным графикам.

В 2006 г. АЦСО-54 МЦ «ВНИИ-Автогенмаш» были проведены аттестационные испытания оборудования для газовой резки и сварки ООО «Тюментрансгаз». Посты были укомплектованы пламегасящими защитными устройствами типа ПГИ (производитель — ЗАО «Мидасот-Т»). На рис. 2 приведена схема и состав поста газовой резки с резаком Р1-01П из аттестационного паспорта, который

Рис. 2. Устройство поста газовой резки: 1 — баллон пропановый 3-50-3,0-К (ГОСТ 15860); 2 — баллон кислородный 40-150У (ГОСТ 949); 3 — редуктор пропановый БПО-5 (ГОСТ 13861); 4 — редуктор кислородный БКО-50-4 (ГОСТ 13861); 5 — рукав пропановый L = 30 м, I-6,3-6,3ХЛ (ГОСТ 9356); 6 — рукав кислородный L = 30 м, III-6,3-20ХЛ (ГОСТ 9356); 7 — пламегаситель пропановый ПГИ-1П (ГОСТ Р 50402—92); 8 — пламегаситель кислородный ПГИ-1К (ГОСТ Р 50402—92); 9 — резак инжекторный газовый Р1-01П (ГОСТ 1077)



Параметр ¹	Относительное значение проверяемого параметра ² , в % к номинальному , для резачков				
	P1-01П	"Маяк-2-01"	P2-01П	P3П	"Огонь-3"
Расход газа, м ³ /ч, не более: кислорода — 2,5—33,2 пропан-бутана — 0,3—0,73	95,5—100 96,7—98,8	96,4—97,8 96,5—100,0	96,5—97,8 95,4—100	96,5—98,7 96,5—100	95,8—98,8 94,7—99,2
Давление на входе в резак, МПа, не более: кислорода — 0,25—1,0 пропан-бутана — 0,001—0,15	95,7—100 94,8—99,1	96,5—98,1 96,3—100	95,4—100 96,3—97,8	96,4—98,7 96,5—99,1	95,6—99,2 65,4—100
Толщина разрезаемого металла 3—300 мм	100				
¹ Для резачков с внутренними мундштуками № 0—6. ² Для резачков с внутренними мундштуками согласно паспортной комплектности.					

составляется АЦСО-54 по согласованию с предприятием-заявителем.

Испытания основного оборудования постов, к которому отнесены резачки пяти различных типов, проводили по решению комиссии по полной программе: три этапа специальных испытаний и практические испытания, включающие резку образцов с последующей механической обработкой кромок и сваркой.

Оценка выборочных показателей приведена в таблице.

Испытания показали соответствие всех технических параметров установленным требованиям, по результатам которых про-

водилась аттестация и получены свидетельства НАКСа об аттестации оборудования постов.

В настоящее время завершается разработка стандарта организации по газопламенной обработке для ООО "Тюментрансгаз".

Сотрудничество, сложившееся между отделом главного сварщика ОАО "Газпром", дочерними и подведомственными предприятиями ОАО "Газпром" и ведущими научными работниками специализированных институтов, позволяет качественно, на высоком научном и техническом уровне осуществлять правильный выбор, внедрение и эксплуатацию нового оборудования в соответствии с

установленными нормативными требованиями, обеспечивая тем самым качество и гарантированную безопасность технологических процессов газовой резки и сварки на объектах опасных промышленных производств.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сборник* нормативных и методических документов системы аттестации сварочного производства. М.: НАКС, 2006.
2. *Порядок* экспертизы технических условий на оборудование и материалы, аттестации технологий и оценки готовности организаций к выполнению работ по диагностике и ремонту объектов транспорта газа ОАО "Газпром". М.: СТО Газпром, 2006.

В. К. ФЕДОРОВ, д-р техн. наук, Г. П. БЕНДЕРСКИЙ, канд. техн. наук,
А. М. БЕЛЕВЦЕВ, д-р техн. наук

О некоторых принципах и особенностях организации инновационной деятельности в современном машиностроении

Современные процессы разработки и внедрения в производство новых, наукоемких высоких технологий и изделий машиностроения — не просто решение конструкторских и технологических задач, а сложный поиск и реализация новых идей с необходимостью принятия весьма ответственных решений в условиях сложного менеджмента. Поэтому вопросы организации, финансирования, планирования и управления проведением таких разработок и внедрения изделий в производство с последующим успешным выходом на рынки сбыта следует рассматривать как комплексную инновационную деятельность.

Организация комплексной инновационной деятельности и управление инновационными процессами в настоящее время являются чрезвычайно актуальными для всех отраслей машиностроения.

Важнейшим признаком инноваций в условиях рыночной системы хозяйствования считается новизна потребительских свойств новых изделий — главная цель развития новой техники и технологии.

Теоретически инновационный процесс — это процесс преобразования научного знания, новой научной идеи в инновацию, т. е. конкретный продукт, технологию, структуру и др. Это сложный процесс последовательных инженерных, технологических, организационных, управленческих и экономических решений, обеспечивающих превращение инновации в конкретное изделие с новыми потребительскими качествами. Особо необходимо подчеркнуть, что реализовать этот сложный процесс возможно, только рассматривая вопросы технологической подготовки производства как важнейшую, реализующую стадию процесса.

По сути, инновационная деятельность направлена на использование и коммерциализацию научных исследований и разработок, улучшение потребительских качеств выпускаемых изделий, совершенствование технологий их изготовления с последующим внедрением и эффективной реализацией на внутреннем и зарубежном рынках.

Предприятия, сталкиваясь с необходимостью создания и продвижения на рынках сбыта изделий с новыми потребительскими свойствами, находятся в различных ситуациях с точки зрения технологической оснащенности, финансовых возможностей, состояния структуры и организации производства, квалификации кадров и др. Темпы их развития и структурной перестройки также различны.

Для одних предприятий даже внедрение уже освоенных ведущими предприятиями методов организации производства, новых технологических процессов, специаль-

ного инструмента и др. может стать шагом вперед в достижении высокого качества изделий и расширения их номенклатуры. Другие же предприятия способны и готовы вести освоение новых технологических идей, сложнейших наукоемких технологий.

В этом смысле и инновации можно разделить на стратегические и модернизационные (текущие).

Стратегические инновации — это инновации, внедрение которых носит упреждающий характер с целью резкого прорыва и получения решающих конкурентных преимуществ в перспективе.

Модернизационные (текущие) инновации — это инновации, позволяющие предприятию постепенно (в текущем режиме) модернизировать производство, улучшать его оснащение, организацию, внедрять определенные технологические новшества с тем, чтобы, следуя за "предприятиями-лидерами" и конкурентами, оставаться на рынках сбыта, постепенно накапливая потенциал для стратегического прорыва.

Реально оба эти подхода к организации инновационных процессов сложно переплетены и встречаются на всех предприятиях, дополняя друг друга.

Необходимо отметить, что развитие инновационных процессов и инновационных методов управления и организации разработок и производства сдерживается тем, что в настоящее время практически разрушена внутриотраслевая и межотраслевая кооперация, которая позволяла новым технологическим идеям, технологическим процессам, новым методам организации производства, освоенным на головных (ведущих) предприятиях, быстро распространяться на предприятиях всей отрасли и даже всей страны.

Не говоря уже о внедрении крупных технологических достижений, это позволяло быстро осваивать новые методы формообразования, упрочнения, обработки, контроля и испытаний, внедрять, например, конвейерные линии с промежуточными технологическими накопителями, роторные методы изготовления деталей, новые методы сборки (в том числе пайки, сварки) и др. Создавались типовая внутриотраслевая технологическая оснастка, специальный инструмент, стандарты предприятий и отраслевые стандарты организационно-технологического вида, т. е. быстрее продвигались частные технологические новшества. Таким образом, резко возрастал технологический потенциал и отраслей в целом, и отдельных предприятий.

Этому также способствовала действовавшая система технического перевооружения отраслей и отдельных предприятий, которая позволяла предприятиям система-

тически обновлять основные фонды. Ведь на устаревшем технологическом и общезаводском оборудовании (а запас морального старения оборудования сейчас на многих предприятиях практически исчерпан) новые инновационные идеи реализовать просто невозможно.

В настоящее время во многом утрачена налаженная система прикладной, заводской и отраслевой науки, ее связи с вузовской и академической наукой. Научно-исследовательские заводские лаборатории отдела главного конструктора и отдела главного технолога, в которых подчас зарождались инженерные и технологические новшества, быстро внедряемые в производство, на многих предприятиях ликвидированы.

Еще одной проблемой является недостаточное финансирование инновационных процессов и отсутствие целенаправленной политики в этом направлении.

Следует отметить, что под развитием новых, наукоемких технологий подразумевается разработка и внедрение таких наукоемких технологий, как, например, ионно-плазменная, технологии эпитаксии, ионной имплантации, электронно-лучевые технологии и др. Все эти и множество других технологий, интенсивно развивающихся с конца 60-х годов прошлого века, уже достаточно изучены и сейчас развиваются в основном с точки зрения новых приложений, уточнений и т. п. Имеются в виду принципиально новые, прорывные технологии — нанотехнологии, информационные, работы в области искусственного интеллекта, геномные технологии, биотехнологии и др., требующие весьма значительных вложений в науку и производство, которые не в состоянии осуществить даже благополучные предприятия.

Так, например, разработка и освоение нанотехнологий невозможны без создания не просто "чистых комнат" или "гермозон", а чистых корпусов-модулей. Например, стоимость чистого производственного корпуса-модуля в технологии производства БИС составляет в среднем 1,0 млрд долл. (в зависимости от типа и диаметра пластин, объема выпуска и др.). Можно привести множество подобных примеров и из области непосредственно машиностроительных технологий. Такое финансирование инновационных процессов не под силу отдельным предприятиям, даже очень мощным.

С учетом изложенного очевидно, что инновационные проекты в этих направлениях могут осуществляться лишь в рамках крупных смешанных или государственных инновационных программ, в которых участвуют предприятия, подразделения РАН и профильных вузов.

Важную роль в реализации таких программ приобретает подготовка специалистов в области управления инновациями. Подготовку специалистов такого профиля осуществляют Российский государственный университет инновационных технологий и предпринимательства, Московский государственный университет инженеров транспорта, ряд вузов Санкт-Петербурга и др.

В 2005 г. кафедра "Управление инновациями" организована и в "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского. Кафедра осуществляет по очной и очно-заочной форме обучения подготовку бакалавров техники и технологии по направлению "Инноватика". В дальнейшем будет проводиться подготовка по программе магистратуры по направлению "Инноватика" и специалитета (подготовка ин-

женеров) по специальностям "Инноватика" и "Управление качеством" со специализациями:

- инженерное и технологическое обеспечение инновационных проектов;
- управление качеством;
- управление инновационными проектами.

Помимо освоения значительного числа социально-экономических дисциплин студенты изучают общепрофессиональные и специальные дисциплины: теорию инноваций, управление инновационными проектами, менеджмент в инновационной сфере, маркетинг, инженерные основы инновационной деятельности, промышленные технологии и инновации, управление производством, экономику и финансовое обеспечение инновационной деятельности, стратегический менеджмент, моделирование инновационных проектов и др.

В цикле естественно-научных дисциплин программа обучения предусматривает следующие учебные курсы: системный анализ и принятие решений, программное обеспечение инновационной деятельности, информационные технологии управления, теория вероятностей и математическая статистика, информатика, основы технологического дизайна и эргономики и др.

Научная работа кафедры планируется по следующим направлениям:

- инновационное управление в наукоемких технологических системах двойного назначения;
- инновационный менеджмент;
- наукоемкие технологии и инновационные проекты;
- методы дизайна в обеспечении качества продукции;
- человеческий фактор в инновационной деятельности.

Освоение образовательной программы "Инноватика" позволяет выпускникам вуза получить необходимые фундаментальные и специальные знания в области управления инновационными процессами на предприятии, территории и регионе, включая инновационные проекты создания конкурентоспособных производств, товаров и услуг, научно-техническое инновационное развитие предприятий малого бизнеса.

В данной работе приведены лишь некоторые принципы и особенности организации инновационных процессов. Данная новая область управления еще, безусловно, требует глубокого осмысления, теоретической разработки, практической оценки.

Среди множества проблем управления инновациями, требующих разработки, следует выделить следующие:

- суть стратегического планирования и управления в инновационных процессах;
- принципы инновационного менеджмента;
- особенности маркетинга в инновационных процессах;
- принципы организации финансирования инновационных проектов и др.

Безусловно, весь огромный потенциал инновационных возможностей развития предприятий или отраслей может быть реализован на основе глубокого понимания тенденций развития современной технологии, прогнозирования глобальных изменений, которые могут проявиться в новых научных и технологических направлениях развития современной техники и технологии.

Г. А. РАСТОРГУЕВ, д-р техн. наук
Российский университет дружбы народов

Организационно-технологическая надежность машиностроительного производства

Важнейшим направлением повышения конкурентоспособности любого машиностроительного производства в условиях рыночной экономики является коренное преобразование существующих форм организации производства на основе автоматизации, использования высокоэффективных технологий, современного технологического оборудования и телекоммуникационных систем.

Обеспечение надежного безотказного функционирования машиностроительного производства — задача многофакторная. Машиностроительному производству присущи признаки многофункциональной системы, такие как ритмичность, поточность, гибкость, специализация. Эти признаки, безусловно, повышают степень технологической надежности рассматриваемой системы. В то же время существуют определенные диспропорции между достигнутым уровнем техники и технологии, с одной стороны, и традиционными малоэффективными методами организации и управления производством, с другой.

Под технологическим потоком понимают совокупность взаимосвязанных средств технологического оснащения и исполнителей для выполнения в регламентированных условиях производства производственных и технологических процессов. Организация и технология машиностроительного производства в обобщенном виде могут быть представлены следующими специализированными технологическими потоками (СТП):

- производство заготовок;
- изготовление деталей и сборочных единиц;
- сборка выпускаемой продукции;
- испытания и приемо-сдаточные работы.

Каждый специализированный технологический поток представляет совокупность частных потоков, объединенных единой системой технических требований и технологическим маршрутом, а также общностью продукции в виде конструктивно-подобных элементов. Например, СТП по производству заготовок может быть составлен из частных потоков по изготовлению отливок, поковок, штампов и т. п. СТП по изготовлению оригинальных деталей включает частные технологические потоки по изготовлению деталей класса валов, втулок, корпусов, шестерен и т. д.

Базовым понятием в теории надежности в обобщенном виде является понятие отказа, т. е. полный или частичный выход системы (или подсистемы, объекта, элемента) из строя, заключающееся в утрате функционального или работоспособного состояния. Отказы технологических потоков подразделяются на три группы: по характеру нарушения работоспособности, по наличию связи с другими потоками, по техническим параметрам и показателям качества. Надежность системы определяется вероятностью отказа в течение определенного (заданного) срока действия.

Анализ известных работ [1–4] позволил выделить пять основных показателей, которые с достаточной репрезентативностью характеризуют особенности организационно-технологической надежности (ОТН): непрерывность, равномерность, ритмичность, совмещение и интенсивность. В теории потока наиболее значимыми из перечисленных признают два показателя: непрерывность и равномерность.

Равномерность машиностроительных производств обозначает соблюдение ритмичности выпуска продукции, причем объем работы, выполняемый за определенный интервал времени, по количеству и составу соответствует трудоемкости изготовления продукции за этот интервал.

Непосредственная обработка заготовки занимает 2–5 % общего времени. Остальное время приходится на транспортные и контрольные операции, а также на межоперационное "пролеживание".

Непрерывность производственного процесса заключается в непрерывности движения заготовок в производстве (т. е. без ожидания обработки), а также непрерывности работы рабочих и технологического оборудования. Только комплекс этих трех факторов обеспечивает полную непрерывность процесса. Непрерывность предполагает сокращение или сведение к минимуму перерывов в процессе производства продукции. Она является одним из важнейших условий сокращения сроков изготовления продукции и повышения уровня использования производственных ресурсов, обеспечения равномерной работы предприятия и выпуска продукции в заданном ритме. Полностью этот принцип реализуется в непрерывном производстве на предприятиях металлургической промышленности, в машиностроении на непрерывно-поточных линиях и автоматизированном производстве. Количественно степень непрерывности определяют отношением длительности технологической части производственного цикла к его полной продолжительности:

$$K = \frac{T_{o.o}}{T_{\text{ц}}}, \quad (1)$$

где $T_{o.o}$ — длительность основных (технологических) операций, мин; $T_{\text{ц}}$ — длительность производственного цикла, мин.

Рассмотрим непрерывность выпуска машиностроительной продукции более подробно. Частные технологические потоки взаимодействуют в специализированном потоке по различным структурным схемам.

Последовательная схема (рис. 1, а) — организационно-технологический процесс осуществляется через последовательно соединенные разнотипные элементы. Под элементом понимается часть технологического потока, условно принимаемая неделимой на данной стадии его анализа. Отказ технологического потока наступает

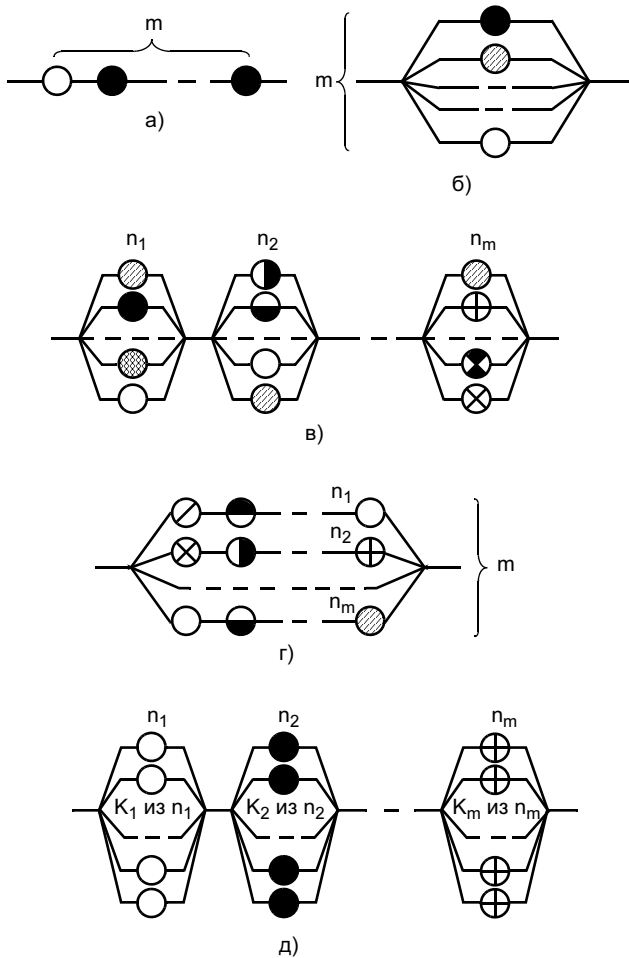


Рис. 1. Структурные схемы технологических потоков: а — последовательная; б — параллельная; в — последовательно-параллельная; г — параллельно-последовательная; д — комбинированная

при отказе любого элемента. Вероятность безопасного функционирования потока

$$P_{(\tau)} = \prod_{i=1}^m P_i(\tau), \quad (2)$$

где P_i — вероятность отказа i -го элемента; τ — временной интервал функционирования потока; $i = 1, 2, 3$; m — порядковый номер элемента.

Параллельная схема (рис. 1, б) — организационно-технологический процесс осуществляется через m параллельно соединенных разнотипных элементов. Отказ технологического потока наступает в результате одновременного отказа всех элементов, входящих в поток. Вероятность безотказного функционирования потока

$$P_{(\tau)} = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - P_i(\tau)). \quad (3)$$

Последовательно-параллельная (параллельное соединение различных элементов) схема (рис. 1, в) — организация и технология изготовления из m последовательно соединенных структур; каждая i -я структура состоит из n_i

разнотипных параллельно соединенных элементов. Отказ технологического потока наступает при отказе любой структуры. Вероятность безотказного функционирования потока

$$P_{(\tau)} = \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - P_{ij}(\tau)) \right], \quad (4)$$

где индексы i, j соответствуют j -му элементу внутри i -й структуры.

Параллельно-последовательная (параллельное соединение различных структур) схема (рис. 1, г) — специализированный строительный поток состоит из m параллельно соединенных структур, каждая i -я структура состоит из n_i последовательно соединенных разнотипных элементов. Отказ технологического потока наступает при одновременном отказе всех составляющих структур. Вероятность функционирования потока без отказов

$$P_{(\tau)} = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^{n_i} P_{ij}(\tau) \right], \quad (5)$$

где индексы i, j соответствуют j -му элементу внутри i -й структуры.

Комбинированная схема (рис. 1, д) соединения структур типа K из n — специализированный поток состоит из m последовательно соединенных структур; каждая i -я структура представляет параллельное соединение n_i однотипных элементов. Отказ i -й структуры наступает при отказе K_i или более ее элементов. Вероятность безотказной работы потока

$$P_{(\tau)} = \prod_{i=1}^m \left[\sum_{j=0}^{K_i-1} c_{n_i}^j (1 - P_i(\tau))^j P_i^{n_i-j}(\tau) \right], \quad (6)$$

где индекс i — соответствует элементам i -й структуры; γ — доверительный уровень.

Последовательные и параллельные схемы используются в механо-сборочном производстве в частных технологических потоках, таких как изготовление корпусных деталей, деталей типа валов. По параллельно-последовательным схемам производят сборку отдельных узлов и сборочных единиц. Комбинированное соединение структур применяют в специализированных технологических потоках изготовления и комплектации выпускаемой продукции в целом. Не исключается возможность применения структурных схем для других технологических потоков, отличных от вышеперечисленных.

Основным методом обеспечения организационно-технологической надежности является метод резервирования, заключающийся в применении дополнительных средств и возможностей с целью сохранения функционирования потока при отказе одного или нескольких его элементов (структур) или нарушения связей между ними. Сущность резервирования заключается в введении в систему промышленного производства избыточности: дополнительных технологических элементов, запасов времени, производительности, алгоритмической гибкости, возможности переналадки и пр. В теории надежности различают пять видов резервирования, из которых четыре — структурное, функциональное, временное, ин-

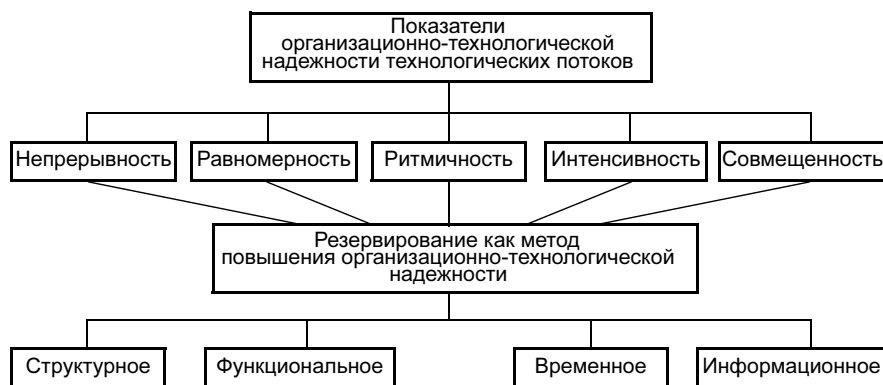


Рис. 2. Структурная схема возможных направлений повышения организационно-технологической надежности

формационное — могут быть использованы в исследованиях (рис. 2).

Структурное резервирование осуществляется введением в технологические потоки дополнительных (резервных) технических средств, способных выполнять функции основных элементов при их отказах. Удаление этих технических средств из технологического потока не должно нарушать способности потока выполнять требуемые функции в заданных режимах и производственных условиях. Структурное резервирование применяется в технологических потоках, характеризующихся следующими особенностями: малым допустимым временем прерывания функционирования; недопустимостью снижения качества изготовления; высокой ценой отказа (технологической, экономической, организационной); развитой системой технического контроля, не допускающей значительной задержки в обнаружении дефектов.

Функциональное резервирование имеет место в сложных технологических потоках, в которых отдельные элементы или группы элементов обладают способностью принимать на себя функции других отказавших элементов на время восстановления их работоспособности без существенного снижения технико-экономических показателей потока. При функциональном резервировании в технологическом потоке отсутствуют резервные элементы, которые могут быть изъяты на постоянное время без нарушения заданных требований к потоку.

Функциональное резервирование обеспечивается гибкостью переналадки многофункциональных элементов (легкопереналаживаемых технологических устройств, гибких производственных систем и т. п.); установлением дополнительных связей между технологическими потоками; прекращением выполнения второстепенных функций и передачей другим элементам освободившихся при этом ресурсов для выполнения основных функций.

Функциональное резервирование используется в тех случаях, когда структурное не приемлемо из-за большого количества оборудования в технологическом потоке. Оно обеспечивает лучшие экономические показатели производства, однако при этом изменяются некоторые качественные показатели, например, снижается производительность, ухудшается точность изготовления, уменьшаются удобства эксплуатационного, ремонтного и другого обслуживания.

Временное резервирование заключается в образова-

нии для отдельных элементов, групп элементов или технологического потока в целом некоторого дополнительного времени, которое может быть использовано для восстановления функционирования потоков без появления временных разрывов.

Временное резервирование достигается созданием запаса производительности (мощности, режимов обработки); увеличением пропускной способности отдельных элементов; размещением запасов продукции в промежуточных и операционных накопителях; снижением тенденции развития неблагоприятных последствий (ущербов) отказов и скорости ухудшения выходных параметров

технологического потока; созданием избыточной производительности путем параллельного включения в работу устройств одинакового назначения (например, замена одноинструментальной наладки на многоинструментальную, одноместного приспособления на многоместное, одноступенчатого режущего инструмента на многоступенчатый).

Временное резервирование как метод повышения организационно-технологической надежности изготовления становится эффективным в технологических потоках с кумулятивным эффектом, позволяющим за дополнительное время улучшить выходные характеристики (точность, стабильность, устойчивость, ритмичность).

Классификационный признак	Разновидность (характер) отказа
Форма изменения параметров (или основных функций) технологического потока до момента устранения отказа	Внезапный Постепенный
Характер внешнего проявления отказа	Явный Скрытый
Возможность использования после возникновения отказа	Полный Частичный
Взаимосвязь отказа с другими параметрами потока	Зависимый Независимый
Возможность устранения отказа	Устранимый Неустранимый Самоустраняющийся
Частота повторения	Повторяющийся Неповторяющийся
Степень устойчивости отказа	Систематический Устойчивый Временный сбой
Возможность прогнозирования отказа	Прогнозируемый по наработке Прогнозируемый по параметру Непрогнозируемый
Вид доминирующего фактора при оценке функциональных последствий отказа	Не выполняются заданные функции в заданном режиме Не выполняются заданные функции в заданное время Не выполняются заданные функции в заданном объеме Вынужденный простой технологического потока
Степень опасности отказа	Опасный Без последствий

Информационное резервирование заключается в образовании нескольких адекватных источников информации или копий массивов информации введением дополнительной информации, предназначенной для восстановления основной информации в случае ее искажения. Информационное резервирование применяется в тех случаях, когда последствия потери или искажения информации значительны, в сочетании со структурными, функциональными и временными формами резервирования. Распространенной формой информационного резервирования является применение компьютерных программ.

Для выбора конкретной формы резервирования необходимо выявить наиболее слабые элементы, отказы которых имеют наибольшую частоту и лимитируют надежность функционирования технологического потока. Взаимосвязь внешних проявлений отказов с исходными первичными поврежденными элементами устанавливается при помощи разработанного классификатора, определения связи отказа элемента с прекращением функционирования технологического потока (см. таблицу). Для упорядочения причинно-следственных связей целесообразно использовать схемы Исикава [5, 6]. Выявление наиболее слабых элементов производится с помощью диаграммы Парето [7], которая ранжирует элементы потоков по частоте возникновения отказов.

ВЫВОДЫ

1. Машиностроительное производство представляет сложную вероятностную систему, надежность функционирования которой является функцией многих параметров. Организационно-технологическая надежность машиностроительного производства зависит от структур-

но-логической схемы и вероятности безотказной работы составляющих ее элементов.

2. Вероятность отказа функционирования любого технологического потока определяется структурной схемой.

При расчете и моделировании технологических потоков выявляются слабые звенья любой структурной схемы, позволяющие выбрать методы повышения надежности на стадии разработки технологии и организации машиностроительного производства.

3. Резервирование — основное направление повышения организационно-технологической надежности. На базе четырех форм резервирования могут быть разработаны конкретные решения, исключающие отказы в функционировании технологических потоков в машиностроительном производстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Калур К., Лимберсон А. Надежность и проектирование систем: Пер. с англ. М.: Мир, 1990. 605 с.
2. Надежность в машиностроении: Справочник / Под общ. ред. В. В. Шишкина, Г. П. Карзова. СПб.: Политехника, 1992. 719 с.
3. Надежность технологических систем: Справочник / Под ред. И. А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.
4. Надежность машиностроительной продукции: Практическое руководство. М.: Издательство стандартов, 1990. 328 с.
5. Пронилов А. С. Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.
6. Рябинин И. А., Черкесов Г. Н. Логико-вероятностные методы исследования надежности в структурно-сложных системах. М.: Радио и связь, 1981. 216 с.
7. Бобровников Г. И., Клебанов А. И. Прогнозирование в управлении техническим уровнем и качеством продукции. М.: Издательство стандартов, 1984. 232 с.

А. К. БОРИСОВ, инж.

ФГУП "СПО "Аналитприбор" (Смоленск)

Управление инновационной деятельностью приборостроительного предприятия

В настоящее время иностранные приборостроительные фирмы реализуют на российском рынке стратегию полного вытеснения отечественных производителей. Очевидно, эта проблема обострится еще более с вступлением России в ВТО. Одними из основных путей выхода из наметившегося кризиса приборостроительной отрасли является повышение качества выпускаемой продукции, освоение новых технологий и обновление основных фондов.

В преддверии вступления России в ВТО вопросы повышения конкурентоспособности и стандартизации качества встали перед многими приборостроительными предприятиями особо остро, так как именно соответствие продукции и бизнес-процессов международным стандартам серий ИСО 9000:2000, ИСО 14.000 и ИСО 18.000 значительно облегчает возможность сотрудничества с зарубежными партнерами, что позволяет надеяться в перспективе на выход на международный рынок сбыта [1, 2].

Для полного соответствия новым стандартам качества необходимо применение новых технологий, разработанных с целью экономии ресурсов, повышения произво-

дительности труда, контроля качества, экологии производства, охраны труда. Новые технологии, как правило, западного происхождения, являются дорогостоящими, что препятствует их применению значительной частью отечественных приборостроительных предприятий. Широкое внедрение новых технологий влечет за собой необходимость технического перевооружения парка станочного, приборного и исследовательского оборудования, что в условиях недостатка инвестиционных ресурсов доступно далеко не всем отечественным приборостроительным предприятиям. Исправить сложившуюся ситуацию правительство РФ пытается путем создания технопарков с особыми экономическими условиями. В их развитие в ближайшее время планируется инвестировать порядка 123 млрд руб. [3].

В то же время еще во времена СССР потенциал научных и производственных организаций, непосредственно связанных с приборостроением, можно было бы с успехом использовать при решении задачи повышения эффективности инновационной деятельности.



Рис. 1. Учет соответствия оцениваемых этапов мировым аналогам и степень их влияния на конкурентоспособность конечной продукции

Очевидно, что успешной реализации инновационного потенциала предприятий приборостроения во многом способствует наличие эффективной системы стратегического управления инновациями, направленной на обеспечение долговременных конкурентных преимуществ отечественной приборостроительной продукции на отечественном и мировом рынках.

Анализ специфических особенностей бизнес-процессов приборостроительного предприятия показывает, что в последнее время наибольшее влияние на показатели его хозяйственной деятельности оказывают технологические инновации, непосредственно связанные с производством датчиков. В этой связи определение приоритетных направлений инновационной деятельности в данной области позволит в значительной степени повысить эффективность используемых инновационных ресурсов.

Авторы статьи на основе многолетнего анализа деятельности ФГУП «Аналитприбор» — ведущего российского производителя газоанализаторов различного назначения — предлагают следующий подход к стратегическому управлению инновационной деятельностью приборостроительного предприятия, включающий следующие этапы.

На первом этапе при помощи предложенной матрицы (рис. 1) оценивают отдельные этапы технологического и производственного процессов изготовления прибора. Координатные оси данной матрицы характеризуют соответствие оцениваемых этапов мировым аналогам и степень их влияния на конкурентоспособность конечной продукции. В соответствии с полученной позицией выбирают определенную инновационную стратегию. Если позиция определяется в непосредственной близости от точки пересечения квадрантов матрицы, то выбирается смешанная инновационная стратегия, включающая основные элементы основных стратегий. Основное внимание при этом следует уделять технологии производства и характеристикам датчика как основного элемента любого сложного измерительного прибора, в значительной степени определяющего его рыночные показатели.



Рис. 2. Учет размеров предполагаемых затрат на реализацию выбранной инновационной стратегии

Второй этап реализуется для случая попадания позиции хотя бы одного этапа оцениваемых процессов в квадранты «Самостоятельная разработка» и «Смешанная стратегия». Для конкретизации направлений реализации данных стратегий предложена матрица, приведенная на рис. 2. Данная матрица позволяет учесть размер предполагаемых затрат на реализацию выбранной инновационной стратегии.

Определенная часть отечественных приборостроительных предприятий выполняет заказы Министерства обороны, МЧС и др., поэтому при возникновении потребности в привлечении значительных ресурсов для реализации инновационной стратегии потребуется соответствующее участие государственных структур. Очевидно, что указанный подход необходимо использовать в рамках известных методов стратегического и инновационного менеджмента для определения наиболее перспективных направлений инновационного развития технологии производства и рациональных способов реализации технологических инноваций [4, 5].

В целом основные положения данной работы можно использовать в процессе управления технологическими инновациями на предприятиях других отраслей промышленности, выпускающих наукоемкую продукцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Огвоздин В. Ю. Управление качеством. Концептуальные проблемы новых стандартов ИСО 9000 // Финансовый менеджмент. 2000. № 5. С. 77—83.
2. Гончаров Э. Как разработать систему менеджмента качества в соответствии с процессным подходом // Стандарты и качество. 2003. № 12. С. 64—68.
3. Витковская С., Белоус Ю. Технопарк — быть. Ведомости. <http://www.vedomosti.ru/newspaper/article.shtml>.
4. Томпсон А. А., Стрикленд А. Д. Стратегический менеджмент. М.: ЮНИТИ, 1998. 576 с.
5. Зуб А. Т. Стратегический менеджмент: Теория и практика. М.: Аспект Пресс, 2002. 246 с.

Содержание зарубежных журналов¹

Machine und Werkzeug (N 6, Vol. 106, 2005, Германия)

Кизгер Р. Фрезерование вместо электроэрозионной обработки, с. 58, 59, ил. 3.

Рассмотрены проблемы производства инструмента для получения миниатюрных элементов, в котором часто используется длительная электроэрозионная обработка, после которой еще необходима доработка поверхности. Уже сейчас имеется возможность заменить эту технологию более прогрессивным фрезерованием, для проведения которого фирма Hitachi Tool Engineering Europe выпускает необходимый режущий инструмент в виде микрофрез разных видов, используя для этого твердые сплавы собственного изготовления. Фрезы имеют нанокристаллическое покрытие TN45+ с термостойкостью до 1100 °С и твердостью до 3600 HV, которыми успешно обрабатывают стали с твердостью 45—72 HRC. Диаметр самой маленькой фрезы составляет 40 мкм, частота вращения 20 000—60 000 мин⁻¹.

Maschinenmarkt (N 45, 2005, Германия)

Система контроля чистоты жидкостей в ваннах, с. 10, ил. 1.

Эффективность промывки деталей существенно зависит от чистоты моющих и промывочных жидкостей. Для постоянного контроля их загрязненности различными частицами Фраунгоферовский институт технологий и автоматизации (IPA) разработал систему Puri-Check, состоящую из погружаемой в поток жидкости сетки, телекамеры и блока анализа изображений. Сетка регенерируется обратной промывкой.

Способ шлифования кругами, оснащенными датчиками, с. 18, ил. 1.

В ходе выполнения кооперативного проекта (координатор — фирма Samt Gobain Abrasives) разработан шлифовальный круг на основе кубического нитрида бора на керамической связке, оснащенный датчиками усилий и температуры и опробованный примерно на 1300 деталях. Сигналы датчиков передаются в систему управления станка и после оценки используются для корректировки режима обработки. Барьер на пути широкого применения таких кругов — их высокая цена.

Легкие детали из вспененных металлов, с. 42, 43, ил. 4. Сообщается, что Фраунгоферовский институт прикладного материаловедения разработал технологию производства деталей из металлической пены, которые при минимальной массе имеют высокую механическую прочность и отличные демпфирующие свойства. К настоящему времени разработано несколько методов получения деталей из пеноалюминия, один из которых позволяет получать трехслойные панели с пористой сердцевиной и монолитными облицовочными листами из алюминия или стали, пригодные для глубокой вытяжки. Разработана также технология получения крупногабаритных деталей из шариков пеноалюминия диаметром

10 мм, которые соединяются друг с другом с помощью клея.

(N 3, 2006, Германия)

Автомат для очистки мелких деталей, с. 46.

Сообщается о компактных автоматах для очистки мелких деталей после механической обработки фирмы Nova Tec. В состав автомата входят ленточный транспортер, агрегат УЗ-очистки, ванна для промывки, маслоотделитель, насос, фильтр, модуль сушки горячим воздухом и шкаф управления. Детали перемещаются внутри автомата во вращающемся барабане.

(N 6, 2006, Германия)

Очистка поверхности детали, с. 16, ил. 1.

Фирма Advanced Clean Production (Германия) предложила "мягкую" очистку поверхности детали струей гранул сухого льда (CO₂). Сжиженный CO₂ в пистолете преобразуется в частицы сухого льда и в виде струи смеси рабочего газа и снега направляется на очищаемую поверхность. Для увеличения скорости струи разработано специальное сопло, которое способствует также экономии газа.

Двухпозиционный обрабатывающий центр с двумя шпинделями, с. 64, ил. 1.

Фирма Wittig & Frank GmbH выпускает обрабатывающий центр Twinflex MD с двумя независимыми, расположенными под углом 90° друг к другу трехкоординатными модулями, приводимыми в движение линейными двигателями. Заготовка крепится на столе с планетарным приводом и обрабатывается одновременно с пяти сторон.

(N 12, 2006, Германия)

Эрозионно-шлифовальный станок, с. 75, ил. 1.

Станок выпускается фирмой Walter Maschinenbau GmbH и предназначен для изготовления деталей из поликристаллических алмазов. Применяемый метод эрозии снижает время обработки на 60—90 мин. Время на правку электрода сведено до минимума.

Metalworking Production (N 9, Vol. 149, 2005, Великобритания)

Новый высокопроизводительный станок с линейным приводом, с. 13, ил. 2.

Описывается станок DMO 50 eVO linear, выпускаемый группой DMG (Великобритания) и позволяющий производить обработку с пяти сторон с одновременным использованием всех осей. Станок имеет стол с ЧПУ, вращающийся вокруг оси В с частотой 40 мин⁻¹ и вокруг оси С с частотой 50 мин⁻¹. Диапазон поворота вокруг оси В для обработки углов возможен на угол до -18°. Быстрые перемещения по оси Х возможны со скоростью до 80 м/мин. Двойное устройство для зажима инструмента снижает время на зажим и съем инструмента до 5 с между резами.

Новая серия токарно-фрезерных станков, с. 24.

В результате исследований и разработок, проведенных фирмой Mori Seiki, создана серия NT станков, комбинирующих фрезерные и токарные многоцелевые станки (горизонтальные станки NH и токарные станки NL). В станках серии NT используются два шариковых винта на

¹Раздел 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).

осей X и Z. Станки серии NH имеют коробчатую структуру, отличающуюся высокой жесткостью. Предусмотрены эффективные устройства для охлаждения шариковых винтов и смазки шпинделя, при этом СОЖ циркулирует вокруг зоны подшипников этих винтов, а спиральная масляная оболочка полностью охватывает шпиндель.

Вертикальные хонинговальные станки, с. 26, ил. 1.

Описаны вертикальные хонинговальные станки, предназначенные для обработки высокоточных отверстий, в частности в гидроцилиндрах и блоках двигателей. Станки характеризуются быстрым циклом работы и высокой производительностью. Они оснащены ПК на базе Windows, цветным сенсорным экраном и блоком памяти. В этих станках возможен сервоконтроль по оси X, расширяющий возможности программирования процессов обработки, в частности обработки профильных отверстий. При этом предусмотрена автоматическая коррекция параллельности, что особенно существенно для глухих отверстий, возможность коротких ходов в любой части отверстия для повышения точности.

Станки для высокоточного шлифования, с. 36, ил. 1.

Описывается высокоточный внутришлифовальный станок IRD-400 группы Danobat, способный шлифовать по радиусу. Станок характеризуется гранитной станиной, цифровыми приводами по линейным осям и осям вращения, встроенным двигателем, создающим высокий крутящий момент для осей вращения, и линейными двигателями для осей X и Z. Обработываемая головка оснащена встроенным приводом и гидростатическим подшипником для обеспечения быстрого и точного позиционирования, а также точного вращения (биение составляет менее 0,2 мкм).

Станок для прецизионной обработки по шести осям, с. 44.

Сообщается о станке DHP50 CPC фирмы Dixi, предназначенном для синхронизированной по шести осям высокоточной обработки, главным образом длинномерных деталей малого диаметра, а также сложных деталей четырехугольной формы. В инструментальном магазине размещаются до 218 инструментов. Станок характеризуется высокой степенью автоматизации технологического процесса и может работать без оператора.

(N 10, Vol. 149, 2005, Великобритания)

Высокопроизводительные токарные многоцелевые станки, с. 11, ил. 2.

Сообщается о новых станках фирмы Takisawa (Таивань). Среди новых станков высокопроизводительные высокопроизводительные токарные станки с ЧПУ типа CNC; вертикальные токарные станки для обработки деталей диаметром до 460 мм; гибкая токарная производственная ячейка с ЧПУ типа CMC для обработки деталей до 200 и 250 мм с осью C и приводными инструментами; двухшпиндельные токарные станки с ЧПУ типа CNC с осью C и приводными инструментами, в патронах которых могут зажиматься детали диаметром 200—300 мм; токарные многоцелевые станки с одним и двумя шпинделями, с осью Y и др.

Повышение эффективности процессов обработки, с. 57.

Сообщается об опыте фирмы Gill Engineering по применению фрезерно-токарного многоцелевого станка Puma MX 200QST фирмы Daewoo с девятью осями, который показал высокую производительность, повысил точность и воспроизводимость при изготовлении деталей, высокую экономичность применения. Этот

станок заменил пять прежних токарных и фрезерных многоцелевых станков.

Применение многоцелевого станка для медицинской промышленности, с. 58, ил. 1.

Сообщается, что фирма Amdale, специализирующаяся на выполнении прецизионных работ, приобрела у группы DMG (Великобритания) многоцелевой станок DMU 50 eVo, предназначенный для обработки призматических деталей для медицинской промышленности. Согласно данным фирмы, при изготовлении инструментов для производства элементов тазобедренных суставов, протеза колен, измерительных средств для медицины применение такого пятикоординатного станка позволило до 40 % сократить длительность цикла обработки по сравнению с ранее применявшимся станком с тремя осями.

(N 6, Vol. 150, 2006, Великобритания)

Технология обработки композиционных материалов с углеволокном, с. 33, ил. 2.

Рассмотрены трудности обработки этих материалов, обусловленные их высокой истирающей способностью, которая в 1000 раз выше, чем у мягкой стали; высокой температурой, возникающей при обработке и способной расплавить матрицу, и др. Проблема обработки решена путем применения инструмента, оснащенного поликристаллическим алмазом, который значительно эффективнее (до 30 раз) твердосплавных инструментов. Проанализированы технологические возможности инструментов с различными видами оснащения такими алмазами и рациональные виды обработок, а также приведены сведения об эффективности сверл (стойкости, толщине материала), используемых, в частности, для сверления деталей аэрокосмической промышленности.

Modern Machine Shop

(N 7, Vol. 78 (ноябрь), 2005, США)

Прутковые питатели, с. 20, ил. 1.

Фирма LNS America, Inc. выпускает автоматические питатели Express 220 и 320, частичная переналадка которых занимает 2 мин, а полная — 8 мин. При частичной переналадке оператор вводит через клавиатуру новый диаметр прутка, длину детали и диаметр канала, а система ЧПУ автоматически задает крутящий момент, скорость подачи, диаметр в люнете и данные по синхронизации для шпиндельной бабки.

Шлифовальные ячейки для обработки опор компрессоров, с. 66.

Описаны шлифовальные ячейки на фирме Tecumseh Products (США), на которых обрабатываются основные опоры компрессоров, пользующихся широким спросом. Детали являются критическими с точки зрения технологичности, для которых задаются жесткие допуски на плоскостность пластинчатой опоры и перпендикулярность плоскости оси отверстия, в которое вставляется вал.

Модернизация шлифовального станка с ЧПУ, с. 66, 67.

Модернизация шлифовального станка с установкой открытой системы OpenCNC компании MDSI (США) позволила существенно повысить его производительность и технологичность. Он производит 50 деталей в 1 ч, а станки с устаревшим ЧПУ — 40. Станок работает на заводе фирмы Tecumseh Products 9 из 10 ч, а другие машины — 4 или 5 ч. Эффект достигается за счет применения специального ПО и аппаратной среды в виде стандартного ПК, смонтированного в электрошкафу.

Точение на шлифовальном станке, с. 80, ил. 1.

На станке S242 фирмы Studer, специализирующейся на производстве шлифовальных станков, можно производить наружное шлифование и точение материалов твердостью 50—60 HRC за один цикл. В случае, если допуски на деталь слишком высоки, точение не производится и деталь только шлифуется, причем шлифовальный круг в процессе обработки непрерывно правится.

(N 7, Vol. 78 (декабрь), 2005, США)

Шлифовальный станок с ЧПУ, с. 6, ил. 2.

Станок LT1 фирмы Landis, имеющий УЧПУ типа CNC, характеризуется низким расположением линии центров. Он эффективен при обработке валов, в том числе коленчатых. Чугунная станина оптимизирована МКЭ. В приводах подачи используются линейные двигатели и гидростатические направляющие, шпиндель также имеет гидростатические подшипники. На задней бабке смонтировано вращающееся правящее устройство УЧПУ открытой архитектуры, построенное на базе ПК. Используются круги диаметром от 80 до 350 мм, в том числе нитридоборные. Окружная скорость при круге диаметром 350 мм составляет 200 м/с.

Режущие пластины, с. 27.

Фирма SECO Carbology предлагает токарные многогранные режущие пластины нового поколения Triple Zero™. Пластины TK1000 из этой серии предназначены для высокоскоростной обработки и отличаются оптимальным износом и жаростойкостью. Кроме обработки чугуна эти пластины можно использовать и при обработке твердых и абразивных материалов. Пластины TK 2000 с покрытием предназначены для тяжелой черновой обработки, нестабильных условий резания и прерывистого резания.

Специальные станки для шлифования валов, с. 43, ил. 1.

Фирма Erwin Junker Machinery Inc (США) специализируется на изготовлении шлифовальных станков для автомобилестроения. На станках фирмы обрабатываются коленчатые и распределительные валы двигателей, детали трансмиссий и рулевого управления. В течение десятилетий фирма накопила большой опыт в этой области.

Lynch M. Кулачковые патроны, с. 104, 106.

На токарных центрах наиболее часто применяют трехкулачковые патроны для закрепления обрабатываемой детали. Оптимизация работы с такими патронами подразумевает быструю и точную предварительную установку "жестких" кулачков в корпусе патрона приблизительно посередине его хода и в соответствии с диаметром предполагаемой детали. При применении "мягких" кулачков их можно растачивать при настройке патрона, например, срезая около 0,1 мм с каждого кулачка.

Инструментальные прецизионные патроны, с. 111.

Фирма Schaublin (США) предлагает прецизионные патроны для закрепления режущих инструментов в шпинделе станка. Корпус патрона имеет хвостовик разного конструктивного исполнения для установки в шпинделе станка упорного фланца и цангового патрона с зажимной гайкой. Предлагаются патроны с хвостовиками ISO 10, 20 и 25, HSK "A", "E", "F", ISO 30 и 40, CAT 40.

Produktion
(N 40, 2005, Германия)

Обработка осесимметричных деталей малого диаметра, с. 32, ил. 1.

Точение и шлифование осесимметричных деталей малого диаметра, например выталкивателей литейных форм, на обычных станках связано с большими трудностями из-за их высокой гибкости и прогибов под действием боковых сил. Для их устранения фирма Hirschmann предлагает свой электроэрозионный станок, оснащенный дополнительным ротационным шпинделем H80R.MAC размером 180 × 195 × 98 мм, массой 20 кг, с частотой вращения до 1500 мин⁻¹. Станок обеспечивает шероховатость поверхности Ra = 0,20÷0,25 мкм.

Kutze T. Эффективная обрабатывающая установка, с. 39, ил. 1.

Фирма Licon MT разработала четырехпозиционную установку RTM 4 MQL 686 LTC 6 серии Lifflex для комплексной обработки с одного установа дисков автомобильных колес из алюминиевого сплава. Установка состоит из трех обрабатывающих центров с шестью шпинделями, стола с планетарным приводом для спутников и обслуживающих механизмов. Шпиндели приводятся в действие общим приводом, частота вращения которых достигает 15 000 мин⁻¹. Чистое машинное время обработки составляет 30 % от обычного, а производительность установки выше, чем у обычных центров на 60 %. Заготовки обрабатываются в сухом режиме или с минимальным применением СОЖ.

Новый прецизионный обрабатывающий центр, с. 40.

Сообщается о центре фирмы Din для изготовления длинных деталей малого диаметра, инструментов, турбинных лопаток и деталей сложной геометрии. Его особенностью является наличие люнетов и задней бабки, последняя позволяет оказывать на заготовку переменное давление. Благодаря наличию магазина на 213 инструментов и магазина заготовок на 12 мест центр может длительное время работать в безлюдном режиме. Перемещения по основным осям 700 × 700 × 700 мм, частота вращения шпинделя 12 000 или 24 000 мин⁻¹, мощность привода 25 кВт, крутящий момент 217 Н·м.

Токарный станок для некруглых деталей, с. 42.

Фраунгоферовский институт производственных технологий (IPT) разработал специальный станок для изготовления некруглых деталей, например овальных поршней к двигателям внутреннего сгорания, работающий в автоматическом режиме. Высокая динамика обеспечивается использованием армированных углеродных волокон, пластмасс и легких линейных двигателей. Максимальная скорость перемещений инструментальной каретки составляет 40 м/мин, салазок с заготовкой — 80 м/мин, ускорения подачи достигают 80g. Для перехода с одной детали на другую достаточно сменить ПО.

Оборудование для сверления и отрезки, с. 43, ил. 1.

Фирма Jaespa изготовила специализированное оборудование для экономичного комбинированного выполнения сверления и отрезки при обработке заготовок длиной до 18 м и сечением до 600 × 300 мм. Оборудование выполнено на базе ленточно-пильного станка 340/630 PG для отрезания под углом и включает два независимо регулируемых узла для сверления горизонтальных или вертикальных отверстий диаметром до 32 мм.

3-я Специализированная выставка нанотехнологий и наноматериалов "NTMEX—2006"

5—7 декабря 2006 г. в Москве в Универсальном выставочном зале здания Правительства Москвы прошла 3-я Специализированная выставка нанотехнологий и наноматериалов "NTMEX—2006", организованная Департаментом науки и промышленной политики Москвы, Московским комитетом по науке и технологиям, ООО "Компания МКМ ПРОФ" (Москва). Выставка является крупнейшей ежегодной российской выставкой в сфере нанотехнологий и наноматериалов и охватывает все аспекты от постановки задач до технического воплощения и промышленного внедрения.

Около 70 научных организаций РАН, вузов, предприятий, фирм и компаний представили свои разработки по следующим тематическим разделам выставки:

- функциональные наноматериалы;
- нанотехнологии и нанотехнологии;
- специальные применения нанотехнологий;
- метрологическое оборудование.

Ниже в кратком изложении приведены организации и их новые научные и прикладные разработки.

ОАО "Всероссийский институт легких сплавов (Москва):

— промышленная технология производства полуфабрикатов из магниевых сплавов (листы и плиты) по российским стандартам и стандартам ASTM. Область применения: авиация, автомобилестроение, космическая техника, спортивное снаряжение, медицинская техника;

— новые алюминиевые сплавы с добавками скандия, а также промышленная технология производства на их основе полуфабрикатов различных видов (слитков из алюминиевых сплавов с добавкой скандия, сварочной проволоки из алюминиевых сплавов на основе систем легирования Al—Mg—Sc и Al—Cu—Sc). Область применения: сварные корпуса космических летательных аппаратов, детали сложной формы, получаемые сверхпластической формовкой, сварные конструкции, работающие в различных агрессивных средах и др.;

— прессованные прутки, профили и трубы из титановых и специальных сталей. Особенности: экономия металла, снижение трудоемкости изготовления, повышение надежности и качества сборки профильных конструкций;

— специализированная линия, которая позволяет изготавливать заготовки деталей любой степени сложности из гранул промышленных титановых сплавов, в основном для авиакосмической техники (рис. 1). Особенности: однородность механических свойств и структуры в объеме детали, высокий коэффициент использования металла, надежная работоспособность деталей в широком диапазоне температур.

ФГУП ВНИИМ им. акад. А. А. Бочвара (Москва):

— первое в России опытно-промышленное производство нанокристаллических магнитных материалов, которое включает вакуумную индукционную печь для получения исходных сплавов, установку центробежного распыления для получения аморфизированных порошков, установку для перевода порошков из аморфного в нанокристаллическое состояние (рис. 2). Область применения: магнитные системы для атомной, автомобильной и авиационной промышленности, радиоэлектроники и др.;

— впервые в России представлены технология получения порошков тантала с нанокристаллической структурой, способ получения высокочастотных порошков тантала конденсаторного класса и их опытно-промышленное производство. Область применения: изготовление высоконадежных танталовых конденсаторов для электронной аппаратуры;

— новый класс наноструктурных электротехнических проводов с чрезвычайно высокими прочностью и электро-



Рис. 2. Установка для перевода порошков из аморфного в нанокристаллическое состояние

проводностью. Область применения: крупные магнитные системы, индукторы для магнитоимпульсных штамповки и сварки, микропровода в устройствах резонансной передачи электроэнергии.

Государственный научно-исследовательский и проектный институт редкометаллической промышленности (Москва) — технологии получения нанопорошков оксидов редкоземельных металлов (размер частиц порошка 10—40 нм) для автомобильной промышленности, микроэлектроники (размер частиц 10—100 нм) для лакокрасочной промышленности, производства пластмасс, нанопористого углерода.

Государственный научно-исследовательский институт химии и технологии элементоорганических соединений (Москва) — новое бескремнеземное связующее корундового состава "Алюмокс", которое не взаимодействует с заливаемым металлом при температуре до 1800 °С.

Использование связующего "Алюмокс" позволяет создать эффективный и надежный технологический процесс изготовления литейных форм для высоколегированных сталей, жаропрочных сплавов, титана и др.

Формы на связующем "Алюмокс" можно использовать также для равноосного, вакуумного литья, литья направленной структуры и монокристаллов.

Научно-исследовательский институт химии (С.-Петербург) — технология получения новых материалов, наноматериалов, микропорошков на основе высокоэнергонапряженных планетарных мельниц. Измельчение в планетарных мельницах позволяет уменьшить размер частиц и достичь эффекта механической активации, в результате чего вещество приобретает новые свойства, происходит аморфизация, повышение реакционной способности в твердофазном состоянии. При спекании порошков наноструктурирован-



а)



б)

Рис. 1. Заготовки деталей для производства изделий из гранул промышленных титановых сплавов: а — блиски с покрывным диском; б — опоры вала авиационного двигателя

ные частицы микронных размеров позволяют получить высокую плотность, твердость и прочность материалов. Область применения: керамические материалы, топливные элементы, катализаторы, дисперсно-упрочненные сплавы, композиционные порошки, утилизация твердых отходов.

ГНЦ РФ Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (Троицк Московской обл.) — плазменно-пылевая технология получения наноструктурированных дисперсных композиционных материалов (ДКМ) — порошков, состоящих из частиц размером 0,1—10,0 мкм, покрытых оболочками из различных элементов и соединений. Суть технологии заключается в том, что в плазме экспериментальной установки пылевые частицы — заряженные до нескольких сотен и тысяч зарядов электроны — образуют квазизжидкие или квазикристаллические структуры, которые левитируют в определенных областях — плазменно-пылевых ловушках. Покрывание наносится на частицы в ловушке с помощью атомного пучка, созданного магнетронным распылителем. Система диспергирования и сбора порошка обеспечивает непрерывность и контролируемость процесса. ДКМ могут применяться в качестве дисперсных

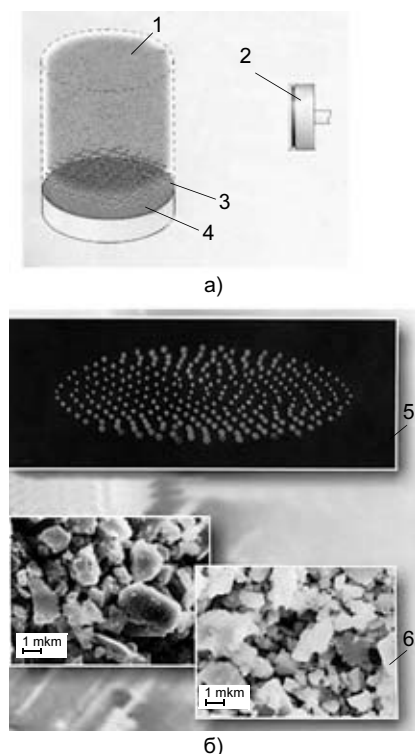


Рис. 3. Схема (а) плазменно-пылевой технологии получения наноструктурированных ДКМ (б): 1 — пылевая плазма; 2 — магнетронный распылитель; 3 — сетчатый высокочастотный электрод; 4 — система диспергирования пылевых частиц; 5 — плоская плазменно-пылевая ловушка; 6 — исходный и покрытый серебром порошок ВСТП-керамики (толщина покрытия 10 нм)

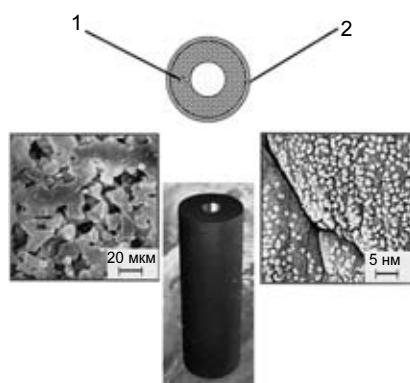


Рис. 4. Новое поколение полимерных трековых мембран для жидкости и газов: 1 — подложка (материал — спеченный пористый полиэтилен, пористая коррозионно-стойкая сталь, никель и др., толщина 15 мм, диаметр пор 5—10 мкм); 2 — мембрана (материал — металлы (Ti, Cu, Al, Ni и др.), оксиды, нитриды металлов и их комбинации, толщина 7—12 мкм, эквивалентный диаметр пор 0,1—0,3 мкм)

катализаторов, для изготовления абразивных, износостойких, высокопрочных, магнитонепроницаемых и прочих покрытий, при изготовлении наноструктурированных конструкционных композиционных материалов и др. На рис. 3 приведена схема плазменно-пылевой технологии получения наноструктурированных ДКМ.

Физико-технологический институт РАН (Москва) — решение фундаментальных физико-технологических проблем изготовления и исследования субмикронных приборов микро- и нанoeлектроники (разработка широкоапертурных источников индуктивно-возбужденной плотной плазмы с высокой поперечной однородностью для плазменно-иммерсионной (метод погружения) ионной имплантации, источники ионов с холодным катодом для реактивного ионно-лучевого травления и осаждения тонких пленок из пучков ионов для микроэлектроники, оптики, лазерной техники, защитные и упрочняющие покрытия (осаждение алмазоподобных пленок) и др., разработка комплекса эмиссионной томографии плазменных источников).

ГНЦ РФ Физико-энергетический институт им. А. И. Лейпунского, Обнинский центр науки и технологий (Обнинск Калужской обл.)

— решение научно-технических проблем в ядерной энергетике;

— более 20 наименований изотопной продукции для диагностики и лечения пациентов как в России, так и за рубежом;

— полимерные трековые мембраны — новое поколение микрофильтрационных мембран для жидкостей и газов с высокими селективностью, производительностью и ресурсом (рис. 4);

— комплекс оборудования (мини-завод) на основе наноструктурированных мембран и природных сорбентов для производства питьевой воды повышенного качества. Производительность от 1 до 10 м³/ч.

Мини-завод основан на экологически безопасном и энергосберегающем сорбционно-мембранном методе очистки воды от различного типа загрязнений. Технология не имеет аналогов. Стоимость установки в 2 раза ниже существующих установок очистки питьевой воды;

— технология изготовления модифицированных наноструктурированных оксидных материалов с улучшенными характеристиками, которая обладает мобильностью и позволяет управлять микроструктурой керамики. Область применения: электроника, электротехника, оптика, изготовление твердотопливных элементов и др. Аналогов технологии в России и за рубежом не имеется.

ФГУП "Красная Звезда" (Москва):

— технология изготовления мембран "ТРУМЕМ", позволяющая выполнять из них фильтрующие элементы практически любой формы (радиус гнба до 5 мм) с неограниченным набором фильтрующей поверхности с высокими абразивной, химической и биологической стойкостью. Фильтры работают в нано-, ультра-, микрофильтрационных областях с размером пор в диапазоне от 0,03 до 5,00 мкм;

— фильтрующие мембранные центрифуги и плоскостные мембранные установки.

Установки с использованием мембран "ТРУМЕМ" эксплуатировались и испытывались на объектах атомной промышленности.

Российский Федеральный ядерный центр — Всероссийский НИИ экспериментальной физики (Саров Нижегородской обл.):

— пористый наноструктурный никель (ПНН), полученный по технологии самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), структура которого представляет высокопористый материал в виде упакованной пористой пленки. ПНН при холодном прессовании легко уплотняется, образуя конструктивный материал, сохраняющий наноструктуру, и легко поддается механической обработке. Область применения: фильтрующий материал для фильтров различного назначения, насадка для нейтрализации выхлопных газов, токопроводящие клеевые композиции (в виде порошка) и др.;

— технический углеродный материал с нанопорами (ТУМаН) — конструкционный материал, образованный слабо связанными между собой сферическими пористыми углеродными частицами диаметром от 1 до 8 мкм. Размер пор в частицах — около 10 нм. Микроструктура материала обеспечивает его высокую удельную поверхность. Содержание углерода 96,0—99,5 %. Изделия изготавливают заливкой жидкой композиции в любую форму с последующим их отверждением и карбонизацией. Область применения: экологически чистые фильтрующие материалы, экологически безопасные мембраны, высокоэффективные сорбенты и др.

Компания "Лаборатория триботехнологии" (Москва—Зеленоград) — наноматериалы для повышения ресурса автомобилей: нанокондиционер металла

FENOM, наноприсадки к маслу для защиты двигателей и трансмиссий, наноочистители смазочных и топливных систем, добавки к топливу. Эффективность препаратов реализуется за счет создания на поверхности трения и износа наноструктурированных защитных пленок, повышения смазывающих и рабочих качеств моторных масел и других факторов.

Научно-производственная коммерческая фирма "МавР" (г. Жуковский Московской обл.) — разработка и производство огнеупорных, теплоизоляционных и огнезащитных материалов: СВС-смеси и кладочные растворы для алюмосиликатных огнеупоров; огнеупорные СВС-бетоны; обмазки и покрытия для экстренного заделывания сколов, прогаров и проведения ремонтно-восстановительных и монтажно-сварочных работ; кладочные СВС-растворы для склейки (сварки) огнеупорных СВС-изделий (кирпичей, блоков, плит и др.) между собой или с другими огнеупорами и теплоизоляционными материалами. Область применения: металлургия, машиностроение, теплоэнергетика, строительные материалы, химическая промышленность и др.

В работе выставки приняли участие вузы (15 экспонентов), среди представленных разработок можно отметить следующие.

Московский государственный университет инженерной экологии — криохимическая технология получения нанодисперсных порошков солей и твердофазных композиций из растворов и суспензий органического и неорганического синтеза. Основные характеристики нанопорошков: размер гранул 0,3—2,0 мкм, форма частиц — близкая к сферической, средний размер кристаллов (частиц) 40—200 нм, удельная поверхность 2—80 м²/г. Отличительные особенности: высокая однородность состава продукта, высокая равномерность распределения мини- и микродобавок, высокая текучесть гранулированных порошков, повышенная сорбционная способность и др. Область применения: ферромагнитные материалы, композиционные материалы, сорбенты, полимеры, оптические материалы, катализаторы и др.

Московская академия тонкой химической технологии им. М. В. Ломоносова — пористый кремний — перспективный материал для опто- и наноэлектроники. Слои пористого кремния (ПК) различного строения и свойств можно получать при использовании стандартных ячеек для электролитического травления. Основным свойством, обусловившим интерес к ПК, явилась его способность к фото- и электролюминесценции при комнатной температуре в видимой области спектра при различных длинах волн. Область применения: элементы кремниевой микроэлектроники, датчики газов, биологические сенсоры, фотонные кристаллы, катоды вакуумной микроэлектроники.

Московский институт электронной техники (Технический университет) — учебно-исследовательская установка для получения углеродных нанотрубок методом химического осаждения из газовой

фазы. Может быть использована для выращивания углеродных нанотрубок в исследовательских целях, различных катализаторах, в том числе в каталитических структурах, сформированных на подложках диаметром до 76 мм. Позволяет получать многослойные углеродные нанотрубки диаметром 5—40 нм, длиной до 20 мкм.

Томский политехнический университет:

- электровзрывная технология получения нанопорошков. Разработаны технология и установка для производства ультрадисперсных порошков различных металлов, сплавов и их химических соединений;

- получение нанопорошков методами плазменного синтеза. Особенности метода: высокая производительность (100 кг/ч), низкие энергозатраты, возможность получения особо чистых соединений (нанопорошки углерода, оксида кремния, диоксида титана и др.);

- ультразвуковая технология компактирования нанопорошков для изготовления изделий сложной формы из наноструктурных и композитных материалов. Технология основана на новых способах сухого прессования изделий сложной формы из керамических нанопорошков на основе разработанного способа регулирования сил трения в прессуемом порошке. Технология запатентована в РФ, странах СНГ, США.

Необходимо также отметить ряд наноцентров, созданных в последнее время: **Информационно-аналитический центр "Наноматериалы и нанотехнологии"** на базе МИСиС, **Наноцентр МЭИ "Нанотроника"**, **Научно-образовательный центр "Нанотехнологии"** Таганрогского государственного радиотехнического университета.

В 2001 г. на базе Международного фонда конверсии (Москва) был образован **ЗАО "Концерн "Наноиндустрия"** — научно-производственная структура, основной задачей которой является разработка и практическое применение нанотехнологий и нанопроductии в различных областях науки, техники и производства. Основные разработки концерна:

- нанотехнологическая установка для проведения нанотехнологических процессов в газах и жидкостях для создания объектов нанометрических размеров;

- износостойкие кластерные покрытия — специальные покрытия, наносимые в гальванических ваннах электрохимическим методом с введением в электролит дозированного количества ультрадисперсного углеродного (алмазного) порошка (кластера) с размерами частиц 50—70 нм, обеспечивающего осаждение мелкозернистого по структуре и износостойкого по функциональному назначению основного металлического покрытия. Область применения: режущий инструмент, производство пластмасс и резино-технических изделий, автомобилестроение, медицина и др.;

- комплекс нанотехнологического оборудования "УМКА" для проведения научно-исследовательских, лабораторных и демонстрационных работ на молекулярном и атомарном уровнях в области физики, химии, биологии, медицины и других



Рис. 5. Нанотехнологическое оборудование "УМКА" на базе сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) (а) и нанотрубки после сканирования 2 × 2 и 0,3 × 0,3 мкм (б)

прикладных наук. Оборудование "УМКА" создано на базе сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) (рис. 5).

Аппаратное и программное обеспечение имеют открытую архитектуру, что позволяет пользователю устанавливать слои модули и проводить обработку данных в реальном режиме времени.

В октябре 2006 г. организован **Центр нанотехнологий и наноматериалов Федерального агентства по атомной энергии**, который должен обеспечивать координацию и развитие работ в сфере нанотехнологий.

Программа развития атомной отрасли РФ, утвержденная Президентом РФ 8 июня 2006 г., предусматривает увеличение доли инновационной составляющей в научно-производственной деятельности Росатома. В соответствии с этой программой разработки в сфере нанотехнологий и наноматериалов должны обеспечить увеличение объема инновационной продукции.

В состав центра входят такие известные научные организации и предприятия, как **Обнинский центр науки и технологий, ГНЦ РФ ФЭИ им. А. И. Лейпунского, ГНЦ РФ ТРИНИТИ, НПО "Луч", ОАО "Свердловский электрохимический комбинат"** и др.

В подмосковном наукограде **Фрязино** 28 ноября 2006 г. прошло учредительное собрание Национальной ассоциации наноиндустрии (НАН), в котором приняли участие представители региональных центров наноиндустрии, научных организаций РАН, ведущих вузов, научно-производственных предприятий из 12 городов России.

В настоящее время в России создана Национальная ассоциация наноиндустрии, которая ставит своей целью способствовать формированию экономической, политической и социальной атмосферы, перевооружению российской промышленности на основе передовых высоких технологий, в том числе с использованием

нанотехнологий, а также содействовать развитию и внедрению нанотехнологий, эффективному продвижению отечественной продукции на зарубежные рынки и укреплению деловых контактов между разработчиками и потребителями продукции nanoиндустрии, осуществлять ведущую роль в сфере подготовки и переподготовки кадров для nanoиндустрии.

Центр фотохимии РАН (Москва) и группа компаний **SIAMS** (Екатеринбург), **Smart Imaging Technologies** (США) выступили с новой инициативой консолидации усилий научного сообщества, представителей инновационного производства и бизнеса в области нанотехнологий — создания Центра nanoинтеграции. Образование такого центра — это совместные проекты по изучению свойств, характеристик и параметров взаимодействия наноразмерных объектов, а также эффективные концепции и схемы использования результатов научной деятельности. Примером такой интеграции является уникальная инновационная разработка для многомасштабного анализа изображений нанообъектов, наноструктур и наноматериалов.

В настоящее время среди совместных разработок **Центра фотохимии РАН** и компаний **SIAMS** можно выделить следующие:

- аналитический комплекс **SIAMS-CP Nanotech** для многомасштабного анализа изображений, нанообъектов, наноструктур и наноматериалов, полученных различными методами. Набор автоматизированных программных решений комплекса позволяет получать количественные данные о структуре индивидуальных нанообъектов, дисперсных систем, объемных наноматериалов;

- **SIAMS-CP Multiscale Modeling** — система многомасштабного моделирования процессов самоорганизации и самосборки наноматериалов.

Наноматериалы и нанотехнологии для медицинских исследований были представлены на стендах **Института физико-химических проблем керамических материалов РАН**, **МГТУ им. Н. Э. Баумана**, **Московского научно-исследовательского онкологического института им. П. А. Герцена**, **Научного центра сердечно-сосудистой хирургии им. А. Н. Бакулева РАМН** и др.

Метрологическое обеспечение и оборудование для изучения свойств наноматериалов продемонстрировали следующие организации:

Институт систем обработки изображений РАН, **Самарский государственный аэрокосмический университет им. акад. С. П. Королева** — установка для оперативного экспресс-контроля шероховатости и степени загрязнения органическими соединениями поверхности диэлектрических подложек, очищенных плазмохимическим травлением при производстве микросхем и дифракционных элементов. Принцип действия установки заключается в измерении скорости растекания калиброванной капли жидкости по поверхности. Скорость растекания зависит от шероховатости и загрязнения по-

верхности. Контроль шероховатости поверхности подложек в диапазоне от 5 до 200 нм, загрязнения поверхности подложек — в диапазоне от 10^{-7} до 10^{-9} г/см². Время контроля не более 2 мин. На устройство контроля чистоты поверхности подложки получен патент РФ.

Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, Научно-исследовательский центр по изучению свойств поверхности и вакуума (Москва):

- измеритель диффузионной длины неосновных носителей заряда в кремниевых пластинах методом малосигнальной поверхностной фотоэлектродвижущей силы;

- эталонная 3D лазерная интерферометрическая система измерений наноперемещений на основе атомно-силового микроскопа оригинальной конструкции;

- эталонная мера ширины и периода МШПС-2.ОК для калибровки средств измерений линейных размеров, применяемых в микроэлектронике и нанотехнологиях. Номинальный размер шага 2000 нм, ширина линии 30—1500 нм, высота (глубина) рельефа 100—1500 нм.

Институт рентгеновской оптики (Москва):

- рентгеновский комплекс (настольный) для экспресс-анализа фазового состава неорганических материалов одновременно с элементным анализом одного и того же исследуемого участка. Программное обеспечение позволяет обрабатывать полученный спектр с определением положения, интенсивности и ширины дифракционных максимумов, разделять наложенные дифракционные пики, вычитать фон, сглаживать спектр, просматривать серию отснятых образцов. Фазовый анализ изучаемых образцов проводится с помощью программы поиска с большим выбором идентификационных критериев на основе базы данных поликристаллических материалов;

- портативный рентгеновский дифрактометр нового поколения на основе поликапиллярной оптики для структурного и элементного анализа порошковых образцов, а также крупногабаритных деталей (рис. 6). Функционально дифрактометр совмещен со спектрометрическим энергодисперсионным каналом, что позволяет получать информацию как об элементном составе, так и о структуре образца. Особенности: миниатюрность, отсутствие перемещений при съемке, одновременная регистрация широкого участка спектра, удобство обслуживания и эксплуатации, высокая разрешающая способность детектора, наличие системы оптического определения места анализа.

Компания НТ-МДТ (Москва—Зеленоград) — широкий спектр сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) на российском и мировом рынках от самых простых для начального обучения и знакомства с нанотехнологией (базовый прибор СЗМ-У) до сложных зондовых нанофабрик ("ИНТЕГРА"), позволяющих изготавливать и проводить анализ наноструктур по различным параметрам (более 40). СЗМ раз-

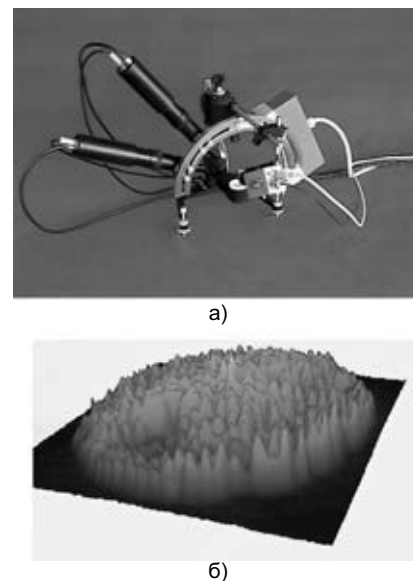


Рис. 6. Рентгеновский дифрактометр нового поколения на основе поликапиллярной оптики (а) и распределение интенсивности рентгеновского излучения на выходном торце капиллярной линзы (б)

личного класса и конфигураций предназначены для исследований широкого диапазона объектов (металлов, полупроводников, диэлектриков, биологических структур, полимеров, порошков и др.).

Среди других фирм можно выделить следующие.

ЗАО НПП "Родник" (Москва) — инструментальные средства и программное обеспечение компании Keithley Instruments Inc. (США):

- системы для электрических измерений параметров наноструктур, аппаратура для измерений и тестирования оптоэлектронных изделий, полупроводников и беспроводного оборудования, системы коммуникации в радиочастотном и СВЧ-диапазонах.

ООО "Системы для микроскопии и анализа" (Москва) — авторизованное агентство компании FEI Company (США) поставляет на российский рынок приборы с фокусированным ионным пучком, сканирующие и просвечивающие электронные микроскопы.

В рамках выставки "NTMEX— 2006" состоялось выездное заседание Координационного совета по развитию нанотехнологий при Комитете Совета Федераций по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии по проблемам и перспективам применения нанотехнологий в сфере городского хозяйства, в котором приняли участие председатель Комитета Федерации по науке, культуре, образованию, здравоохранению и экологии В. Е. Шудегов (председатель координационного совета), члены Московского координационного совета по наноматериалам и технологиям, а также руководители ве-

дущих научных учреждений и производственных предприятий.

На заседании с докладами выступили д-р техн. наук С. В. Серебрянников (ректор МЭИ, академик РАН, д-р техн. наук М. А. Ананян (генеральный директор концерна "Наноиндустрия"), д-р техн. наук Ю. С. Карабасов, ректор Московского государственного института стали и сплавов (председатель Московского координационного совета по наноматериалам и технологиям) и др.

Состоялись "круглые столы" по во-

просам применения наноматериалов и нанотехнологий в различных областях промышленности, науки и техники: "Нанозлектроника: настоящее и будущее", "Наночастицы для биомедицины", "Химическая технология наноматериалов и наноструктур", "Целевая системная интеграция соисполнителей инновационных проектов", "Современное инновационное образование и исследования в области нанотехнологий", а также официальная церемония награждения участников выставки.

3-я Специализированная выставка

нанотехнологий и наноматериалов "NTMEХ—2006" продемонстрировала передовые отечественные разработки, реализация которых предусмотрена в рамках приоритетных национальных проектов в области наноиндустрии, содействовала их продвижению на международный рынок, а также привлечению отечественных и зарубежных инвестиций в данный сектор экономики, основой которой в настоящее время являются наноматериалы и нанотехнологии — технологии XXI века.

Ан. А. СУСЛОВ, канд. техн. наук

8-я Международная автомобильная конференция "Двигатели для российских автомобилей"

В августе 2006 г. в Москве на МВЦ "Крокус Экспо" состоялась 8-я Международная автомобильная конференция "Двигатели для российских автомобилей". Конференция прошла в рамках деловой программы Московского международного автомобильного салона "Автосалон-2006". Организаторы конференции — ОАО "АСМ-холдинг" при поддержке Минпромэнерго РФ и ТПП РФ, ОАР, НАПАК при научном сопровождении ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ". Спонсором мероприятия выступила французская компания Le Moteur Moderne ("Современный двигатель").

В работе конференции приняли участие свыше 160 ведущих отечественных и зарубежных специалистов в области автомобильного моторостроения и смежных отраслей.

Было заслушано 25 докладов и сообщений о современном состоянии и тенденциях развития отечественного и зарубежного моторостроения. Обсуждаемые проблемы являются чрезвычайно актуальными для предприятий автомобилестроения и машиностроения в свете необходимости постоянного мониторинга реализации "Концепции развития автомобильной промышленности России на период до 2010 г."

Доклады на конференции были сгруппированы по четырем сессиям в зависимости от обсуждаемой проблематики.

В концептуальном докладе заместителя генерального директора ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ" (головной организации автомобильного моторостроения РФ) П. Л. Озимова "Перспективы развития автомобильного двигателестроения России" были представлены перспективные отечественные транспортные двигатели мощностью от 25 до 1000 л. с. на период производства 2006—2015 гг. Отмечалось, что в предстоящем десятилетии потребуются модификация всех выпускаемых бензиновых двигателей, а также создание и освоение производства двигателей нового поколения с широким использованием мехатроники, микроэлектроники, новых материалов и катализаторов. Для этого, по мнению докладчика, целенаправленное и скоординированное развитие производства дизелей и бензиновых двигателей для автомобильной, тракторной и сельскохозяйственной техники потребует разра-

ботки и реализации целевой программы, определяющей направления работ, объемы производства и сроки освоения двигателей, а также комплектующих изделий.

В работе конференции приняли участие отечественные корпоративные производители автомобильных силовых агрегатов, в том числе ОАО "АвтоВАЗ", ОАО "КамАЗ", Дивизион "Двигатели Группы "ГАЗ".

Информационное сообщение "Двигателестроение в КНР" было представлено редакцией экономического журнала "Автобизнес".

Значительное число отечественных и зарубежных докладов было посвящено проблемам разработки, производства и поставки специфических моторных компонентов.

Ряд выступлений касался сложных элементов моторной автоэлектроники, которая сейчас во многом определяет как параметры динамики и топливной экономичности двигателей, так и их экологические характеристики.

Отечественные производители автокомпонентов были представлены на конференции докладами представителей ОАО "КамАЗ", ОАО "Автрамат", Белебеевского завода "Авто-нормаль", ГНЦ РФ ФГУП "НАМИ" и НТЦМ "Металлург".

Зарубежные фирмы также выступили с интересными докладами по перспективным разработкам, среди них: "Роберт Бош" (Германия, Нидерланды), ООО "Палл Евразия", Le Moteur Moderne (LMM) (Франция), СЕС (США), ООО "Сименс ФДО Аутоматив", Представительство "И.Л.М. Хандельсконтор ГмбХ".

В свете принятого Правительством РФ в 2005 г. Федерального закона "О ратификации Киотского протокола и рамочной конвенции ООН об изменении климата" весьма актуальными были доклады, посвященные различным аспектам обеспечения европейских экологических норм отечественными АТС. Среди них следует отметить завод автомобильных катализаторов УЭХК, ОАО "Владимирский моторно-тракторный завод", "Роберт Бош" (Германия), компанию "Джонсон Мэтти" (Великобритания).

Е. С. ДОБРИНСКИЙ, канд. техн. наук

Международная выставка "Технологии промышленной окраски"

В Москве в ВК "Сокольники" с 7 по 10 ноября 2006 г. проходила международная выставка "Технологии промышленной окраски". В ней приняли участие российские и зарубежные фирмы, в том числе НПФ "Элстар", ЗАО "Блестящая линия", ОКБ "Радикал поток", АО "Промкомплект", ЭПО "Полимеры", ЗАО "Спецтехника" и др. Следует отметить, что многие россий-

ские предприятия предложили на выставке технологии и оборудование, разработанные за рубежом.

Приведем краткое описание некоторых экспонатов, демонстрировавшихся на выставке, и предложений фирм-разработчиков, вызвавших наибольший интерес у специалистов.

ООО НПФ "ЭЛСТАР" (Москва) де-

монстрировало различное распылительное оборудование, установки для нанесения порошкового покрытия и другие устройства.

Распылительное оборудование серии КРВП для зарядки, распыления и осаждения порошковых диэлектрических материалов (полимерных и стекломалевок) на электропроводные изделия в электри-

ческом поле. Частицы порошка принудительно заряжаются ионами в поле коронного разряда отрицательной полярности (электростатический способ). Питание распылителя от генератора, напряжение 220 В, рабочий ток 40 мкА, потребляемая мощность 60 Вт. Высоковольтный блок вмонтирован в корпус распылителя и создает на его выходе рабочее напряжение до 80 кВ, гарантирующее эффективную зарядку частиц порошка при его больших расходах (до 25 кг/ч). Генератор автоматически оптимизирует электрические параметры в зоне распыления в зависимости от расхода порошка, расстояния до окрашиваемого изделия и его формы, типа используемого порошка. В распылительном оборудовании предусмотрены следующие режимы окрашивания: плоские изделия, повторный слой, сложные изделия. Давление в сети сжатого воздуха 0,5–10 МПа, расход сжатого воздуха до 250 л/мин. На выставке демонстрировался комплект распылительного электрооборудования КРВП-11-60-К-Д с бункером-дозатором для работы на окрасочных участках и постах ручной окраски автоматических линий в комплекте с камерой напыления и печью оплавления; комплект распылительного электрооборудования КРВП-21-60-К (компакт) для работы на окрасочных участках, лабораториях в комплекте с камерой напыления и печью оплавления; комплект распылительного электрооборудования КРВП-22-60-К для оснащения автоматических линий порошковой окраски.

Печь ПФП-250 для оплавления и полимеризации порошковых полимерных покрытий, нанесенных на металлические поверхности. Камера печи представляет теплоизолированный контейнер с двойными стенками, пространство между которыми заполнено несгораемым теплоизолятором. Внутри камеры в вентилируемых коробах на керамических изоляторах смонтированы нагревательные элементы. Продувка коробов и принудительная конвекция воздуха в камере осуществляются вентиляторами. Привод вентиляторов обеспечивается электродвигателями, вынесенными за пределы рабочей зоны камеры. Для удаления летучих газов, образующихся в процессе полимеризации, печь формирования покрытий оборудована принудительной вытяжной вентиляцией, оснащенной заслонкой-клапаном, автоматически открывающимся при включении вентилятора. Запуск печи производится оператором с пульта управления. Поддержание заданной температуры (до 250 °С) в печи осуществляется в автоматическом режиме. По окончании процесса формирования покрытия на изделии печь автоматически отключается и включается вытяжная вентилятор. Габаритные размеры печи 1600 × 2000 × 7000 мм, удельная мощность 3 кВт/м³, питающее напряжение 380 В, время выхода на заданный температурный режим из холодного состояния без нагрузки 30 мин.

Установка для подготовки поверхности изделий струйным способом перед их покрытием порошковыми красками. Установка состоит из камеры подготовки по-



Рис. 1. Робот-манипулятор PM-2000

верхности тупикового типа периодического действия, трех ванн для растворов, электрокалорифера, бака-отстойника для обезжиривающего раствора и щита управления. В камере подготовки последовательно осуществляются следующие стадии технологического процесса: обезжиривание с одновременным фосфатированием; две промывки; сушка горячим воздухом. Выполнение последовательных технологических операций автоматизировано. Ванна обезжиривания и две ванны промывки размещены под корпусом камеры. Вверху камеры на площадке установлен вентилятор с электрокалорифером. Внутри камеры имеются воздухопроводы подачи горячего воздуха на изделия. Под потолком камеры установлен монорельс, по которому изделия подаются в рабочий объем камеры. Загрузка и выгрузка изделий ручная. Регулирование температуры раствора происходит в автоматическом режиме. Контроль уровня раствора и воды в ваннах — визуальный.

Робот-манипулятор PM-2000 (рис. 1) для оборудования установок окраски порошковым напылением, работающих в автоматическом режиме. Состоит из стойки высотой 3400 мм с электроприводом мощностью 1 кВт, манипулятора для крепления распылителей (ход манипулятора 650—2800 мм). Рабочий ход определяется концевыми выключателями и системой управления. Вертикальная скорость перемещения манипулятора 0,05—1,00 м/с. Максимальная масса перемещаемого груза 15 кг.

Фирма "Эколайн" (Москва) предложила потребителям различные машины для обезжиривания деталей.

Машина МТ-150 для обезжиривания мелких и длинномерных деталей. Рабочий бак машины вместимостью 230 л имеет прямоугольную форму и загружается через герметичный люк, расположенный в его торце. Загрузка (выгрузка) машины производится вручную с загрузочного стола. Максимальная загрузка 150 кг. Длинномерные детали загружаются укладкой друг на друга с дистанционными проклад-

ками. Продолжительность обработки деталей 15—30 мин. Питающее напряжение машины 220 В, габаритные размеры 2000 × 1100 × 1700 мм.

Машина СА-5000 для обезжиривания крупногабаритных деталей. Рабочая камера машины с герметичным люком также имеет прямоугольную форму, габаритные размеры определяет заказчик. Она оснащена выдвижной платформой, позволяющей производить загрузку или навеску изделий снаружи. Для визуального контроля за процессом обработки (время обработки 15—40 мин) на боковой стенке рабочей камеры предусмотрен иллюминатор. Вместимость рабочей камеры 5000 л. Питающее напряжение машины 380 В.

Компания "Политон" (Казань) предложила оборудование для нанесения порошковых покрытий.

Камера нанесения покрытий (габаритные размеры 2400 × 1500 × 1900 мм) выполнена отдельными блоками с возможностью варьирования габаритами и одновременного двухстороннего нанесения порошка. Потребляемая мощность установки 3,2 кВт.

Система рекуперации, интегрированная в корпус камеры напыления. Она выполнена по многоступенчатому принципу, снабжена системой обратной волны и вентиляционной системой. Такая система улавливает до 99 % порошка, не осевшего на окрашиваемых деталях.

Распылитель "MetEor-A", работающий в автоматическом режиме. Корпус распылителя изготовлен из армированного пластика. В его рукоятке нет электрических и электронных компонентов, что делает распылитель электробезопасным. Большой ассортимент стеклонаполненных и керамических насадок позволяет получать факел с программируемым отпечатком. Распылитель наряду с традиционными контурами может производить плоскоструйное окрашивание сложнопрофильных изделий. Специальная насадка позволяет производить напыление внутренних поверхностей. Самонастраиваемая электронная схема дает возможность работать со всеми видами порошковых красок и регулировать толщину их слоя. Давление сжатого воздуха, подаваемого на вход пульта управления, 0,2—0,4 МПа, вместимость встроенного бункера для краски 0,4 л, скорость окрашивания до 3 м²/мин. Питающее напряжение распылителя 220 В, потребляемая мощность 25 Вт. Габаритные размеры пистолета-распылителя 430 × 190 × 35 мм, масса 0,4 кг.

АО "Промкомплект" (Санкт-Петербург) демонстрировало оборудование для гальванических цехов, очистки сточных вод и толщиномеры покрытий.

Автоматическая линия для цинкования стальных изделий в барабанах. Установку применяют для щелочных электролитов цинкования. Цинковые аноды растворяются в отдельной ванне, а затем через систему фильтрации подаются в основную ванну. В основной ванне используются нерастворимые аноды — стальные никелированные пластины. Габаритные размеры ванн 2400 × 300 × 1000 мм. На автоматической линии обрабатывают



Рис. 2. Электронный прибор Quanix 1500

ся стальные изделия при толщине покрытия 6—12 мкм, производительность 700 кг/ч. Она оснащена десятью барабанами и двумя манипуляторами.

Толщиномеры покрытий — один из основных инструментов, используемых в лакокрасочной промышленности. В основу работы толщинометров положен электромагнитный и вихретоковый принципы неразрушающего контроля. Приведем краткое описание некоторых приборов, демонстрировавшихся на выставке.

Электронный прибор *Quanix 1500* (рис. 2) с расширенным диапазоном измерений для измерения толщины покрытий на различных металлических поверхностях. Прибор измеряет толщину всех ферромагнитных покрытий на стали, железе и т. п. величиной до 5000 мкм. Он оснащен двухсторонним дисплеем и удерживает в течение 10 с последнее значение измерений, имеет память на 3900 значений. На дисплее отображаются максимальное, минимальное и среднее значения измерений. Прибор компактен и эргономичен. У датчика имеет V-образная канавка для измерения толщины покрытия на прутках и кривых поверхностях.

Прибор *Quanix 4500* для измерения толщины покрытий, таких как лак, краска, пластик, эмаль, хром, медь, цинк и т. п. Работа прибора основана на электромагнитном и вихревом принципах измерения толщины покрытий. Управляется прибор одной кнопкой.

Производственная компания **"Техпромсинтез"** (Москва) — разработчик, производитель и поставщик защитных материалов — предложила потребителям антикоррозионный материал.

Защитный материал наносится в один слой толщиной 150—250 мкм без грунтовки. Он может наноситься и формировать покрытие при отрицательных температурах. В результате образуется эластичное покрытие с высокой прочностью сцепления. Такое покрытие обладает стойкостью против воздействия промышленной атмосферы в различных климатических зонах, ультрафиолетовых лучей, абразива, перепада температур (–60—100 °C). Перед нанесением защитного материала металлическую поверхность очищают от грязи, жира, рыхлой ржавчины, старого лакокрасочного покрытия. Материал можно наносить на поверхность с остатками плотносцепленной ржавчины (до 100 мкм). Окрашиваемая поверхность должна быть сухой. При нанесении и высыхании температура окружающего воздуха, окрашиваемой поверхности и самого ма-

териала не должна быть ниже 5 °C. Относительная влажность воздуха не должна превышать 80 %. Максимальный экономический эффект достигается при проведении ремонтных работ.

ООО **"Евро-Декор"** (Москва) — официальный представитель итальянской компании *Europolveri S.P.A.* — показало на выставке установку для электростатического напыления *"Декор 2001"* (рис. 3). Установка обеспечивает равномерное распределение краски по толщине без образования уплотнений в кромочной зоне; быстрое и качественное окрашивание изделий сложной формы; возможность увеличения толщины покрытия и нанесения второго слоя. Она состоит из блока управления электрическими и пневматическими параметрами установки; распылителя со встроенным высоковольтным блоком, обеспечивающим нанесение порошковой краски в создаваемом электростатическом поле; бункера с мембраной из пористого материала, служащего для хранения и псевдооживления порошковой краски, обеспечивая ее равномерную и стабильную подачу на распылитель. Габаритные размеры установки 1070 × 400 × 545 мм, длина кабеля-шланга до 8 м. Напряжение питания 220 В, на некоронирующем электроде — до 72,5 кВ, давление сжатого воздуха 0,3—0,8 МПа, потребляемая мощность до 50 Вт, расход воздуха до 150 л/мин, вместимость бункера 41 л.

ЗАО **"Р.П.Е."** (Санкт-Петербург) демонстрировало на выставке следующее оборудование:

— аппарат *OptiFlexS* (рис. 4), разработанный в Германии. Такой аппарат стабильно работает даже с самыми сложными порошками благодаря механизму перемешивания, который обрабатывает порошок массой 0,5—9,0 кг. Аппарат работает со всеми типами порошков, включая металлизированные, и обеспечивает быструю смену цвета. Его прочистка осуществляется через откидную крышку, расположенную снизу резервуара, с механизмом перемешивания. Оставшийся порошок высыпается в тару. Применение аппарата позволяет производить двухстороннее окрашивание.



Рис. 3. Установка для электростатического напыления "Декор 2001"

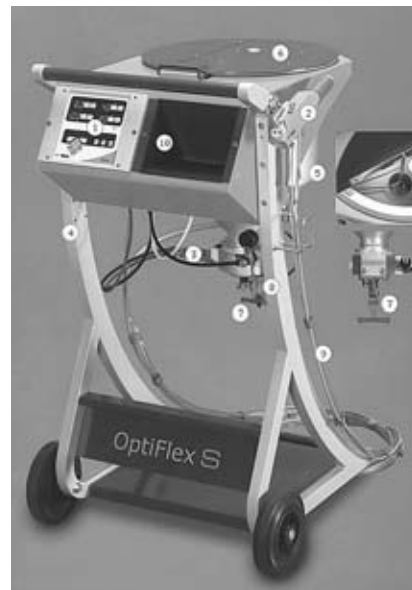


Рис. 4. Аппарат *OptiFlexS*: 1 — блок управления *OptiStar*; 2 — ручной пистолет *OptiSelect*; 3 — инжектор *OptiFlow*; 4 — транспортная тележка; 5 — резервуар для порошка; 6 — встроенный механизм перемешивания; 7 — откидная крышка; 8 — фильтр; 9 — токопроводящий шланг порошка; 10 — отсек для хранения инструментов

— установку ручного напыления *OptiFlex1-B ITW/G-EMA*, разработанную в Швейцарии. Она работает по принципу цифрового регулирования всех параметров технологического процесса нанесения порошка. Количество порошка, объем воздуха, программа окрашивания, питающее напряжение и ток устанавливаются с блока управления или ручного пистолета. Наклоненный вибростол позволяет полностью использовать порошковую краску. Большие колеса тележки повышают устойчивость всей конструкции, делают ее более маневренной. Производительность установки до 6 м²/мин. Краска может наноситься на изделие любой сложности профиля. Потребление сжатого воздуха до 8 м³/ч, питающее напряжение 220 В, потребляемая мощность 150 Вт.

ЗАО **"ЭПО-полимеры"** (Москва) демонстрировало на выставке корректор — *PLP*, разработанный в Германии. Он служит для устранения небольших дефектов металлической поверхности, окрашенной порошковой краской, таких как царапины и сколы краски. Корректор оснащен баком, в котором размешивается порошковая краска, соответствующая корректируемому покрытию цвета и типа. Таким образом, можно изготовить лак требуемого цвета для ремонта мелких дефектов поверхности в короткое время.

ЗАО **"Спецтехника"** (Москва) показало на выставке окрасочные установки, произведенные в Германии фирмой *J. Wagner GmbH*.

Электростатический пистолет-напылитель *PEM-C3R* (рис. 5), работающий



Рис. 5. Электростатический пистолет-напылитель PEM-C3R

по заданной программе и осуществляющий равномерное покрытие. Он идеально подходит для нанесения металлик. Его масса без соединительных кабелей 498 г, длина 355 мм, расход краски до 300 г/мин.

Ручной трибопистолет PEM-T3R, работающий по заданной программе. Выбор программ и подача порошка осуществляются с корпуса пистолета. Такой пистолет хорошо окрашивает углы и острые кромки изделия. Масса пистолета 590 г.

Манипулятор KHG 350 с коротким ходом каретки (рис. 6), применяемый при использовании вертикально расположенных пистолетов. Такой манипулятор хорошо подходит для применения в компактных камерах и камерах с быстрым переходом с цвета на цвет. Он имеет прочную конструкцию и регулируемый ход каретки. Регулируемая скорость рабочего хода 15—55 м/мин. Манипулятор оснащен электродвигателем мощностью 0,75 кВт с кривошипным механизмом и контроллером SSR-D1 короткого хода каретки. Специальный элемент — согласователь Дельта — позволяет увеличивать скорость перемещения каретки в точке реверса, таким образом достигается равномерность толщины покрытия. Максимальная скорость перемещения каретки 3 м/мин, высота ее хода 100—350 мм. Питающее напряжение манипулятора 220 или 380 В.

Модуль EPG-D1 для управления работой напылителями конструктивно состоит из блока центрального управления и LCD дисплея; устройства памяти на 32 программы окрашивания; системы AFC контроля подачи воздуха; установки значения и отображения фактического напряжения на коронирующем электроде; ограничителя по току; трибодисплея с функцией мониторинга; устройства контроля продувки и выброса порошка. Потребляемая мощность модуля до 40 Вт, напряжение на коронирующем электроде 20—100 кВ, ограничение по току 20—160 мА с шагом 1 мА. Расход транспортного и дозирующего воздуха 0,05—6,00 м³/ч. Га-

баритные размеры модуля 270 × 140 × 300 мм, масса 6,5 кг.

Фирма Alufinish GmbH Co.KG (Германия) через представительство ООО "Алюфиниш Рус" (Москва) показала на выставке технологию полимерной пассивации без промывки обрабатываемой детали и химические препараты для предварительной обработки алюминиевых и оцинкованных поверхностей перед нанесением лакокрасочных и порошковых покрытий.

Препарат Alficoat 770/Alficoat 771 для хромирования, не требующий дополнительной промывки. Данный кислородсодержащий двухкомпонентный препарат состоит из полимера Alficoat 770 и хромирующего раствора Alficoat 771. В отличие от обычных технологий нанесения конверсионных пленок химическая реакция данной технологии происходит уже в сушильной установке. В процессе сушки образуется оксидный слой покрытый полимерной пленкой. Одновременно практически весь шестивалентный хром переходит в трехвалентный. Благодаря реакции при такой технологии предварительной обработки в заключительной промывке нет необходимости. Соответственно нет необходимости и в многоступенчатой и дорогостоящей очистке хромсодержащих отработавших вод. По словам разработчиков, препарат имеет универсальную область применения и используется для предварительной обработки алюминиевых, стальных и оцинкованных поверхностей. Образующиеся конверсионные слои

бесцветны и с легким желтоватым оттенком. Масса покрытия зависит от концентрации препарата и составляет 0,02—0,20 г/м².

Эта же фирма предложила потребителям химические препараты для предварительной обработки алюминиевых и оцинкованных поверхностей перед нанесением лакокрасочных и порошковых покрытий. Приведем краткое описание лишь некоторых.

Alfideox 72/Alfideox 15 — жидкий деэмульгирующий двухкомпонентный обезжиривающий травильный раствор на основе фосфорной кислоты, не содержащий фторидов. Он идеально подходит для предварительной обработки литых алюминиевых изделий благодаря своему минимальному агрессивному воздействию на них. Благодаря низкому пенообразованию рекомендован для применения в распылительных установках.

Alfipas 740/Alfipas 740-1 — экологически безопасная технология предварительной обработки алюминия и его сплавов. Она защищает от коррозии нанесением лакокрасочных и порошковых покрытий. Препарат не содержит тяжелых металлов. Может быть применен для очистки сточных вод.

Alficoat 748 — пленкообразующий пассивирующий препарат, не содержащий хрома и не требующий промывки, для алюминия и алюминиевых сплавов.

Промышленная группа "ОСТ" (Витебск) демонстрировала *мобильную электростатическую установку М90* для комбинированного распыления. Минимальные потери материала на туманообразование, высокий КПД позволяют экономить до 30 % лакокрасочных материалов по сравнению с традиционным воздушным распылением. Такой аппарат особенно подходит для покраски сложных профилей и труднодоступных мест. Установка мобильна, смонтирована на легкоуправляемой тележке с дополнительным местом для емкости под краску (25 л) и состоит из пистолета "Классик М90", источника высокого напряжения 85 кВ, насоса высокого давления, шланга для воздуха и краски, регулятора входного давления сжатого воздуха. Пистолет имеет воздушную поддержку. Оптимальные размеры сопла и материал, из которого оно изготовлено, гарантируют длительный срок службы пистолета. Регулировка факела распыления обеспечивает адаптацию к геометрии детали. Насос высокого давления изготовлен из коррозионно-стойкой стали; опорные поверхности покрыты карбидом вольфрама; поршень и цилиндр защищены сверхтвердым хромовым покрытием, снижающим абразивный износ. Производительность установки 1 л/мин, габаритные размеры 1300 × 900 × 650 мм, масса 71 кг.

Во время прохождения выставки были организованы "круглые столы" и семинары, между представителями различных фирм и компаний были заключены взаимовыгодные соглашения.

А. Н. ИВАНОВ, инж.



Рис. 6. Манипулятор KHG 350

12-я Международная специализированная выставка "Металлэкспо—2006"

14—17 ноября 2006 г. в Москве на ВВЦ прошла 12-я Международная специализированная выставка "Металлэкспо". В ней приняли участие более 700 экспонентов из России и многих стран мира. Ниже приведено краткое описание технологического оборудования, демонстрировавшегося на выставке и вызвавшего интерес у специалистов.

Компания "Рэлтэк" (Екатеринбург) предложила потребителям:

— универсальную закалочную установку УИНЗ-160-10,0 для закалки наружных и внутренних гладких, зубчатых, шлицевых и ступенчатых поверхностей машиностроительных деталей типа вал, вал-шестерня, шестерня, зубчатое колесо и т. п. Закалка деталей производится непрерывно-последовательным способом, сканированием индуктором поверхности термообрабатываемой детали. Для равномерной закалки всей поверхности деталь вращается вокруг своей оси. Установка УИНЗ выпускают вертикального и горизонтального сканирования. Для изделий длиной до 3 м применяют установки вертикального сканирования, а более 3 м — горизонтального сканирования. В состав установки входят тиристорный преобразователь частоты и закалочный станок, в котором предусмотрены механизм перемещения закалочного трансформатора с индуктором вдоль оси детали и механизм вращения детали вокруг своей оси. Привод механизмов обеспечивает плавное изменение скорости подачи и вращения. Блок компенсирующих конденсаторов компенсирует реактивную мощность. Двухконтурная станция охлаждения обеспечивает охлаждение элементов тиристорного преобразователя и блока конденсаторов дистиллированной водой (для исключения электрохимической коррозии). Пульт управления установкой оснащен приборами измерения и индикации режимов закалки. Мощность источника питания 160 кВт, напряжение питающей цепи 380 В, температура нагрева под закалку 900—1100 °С. Размеры закаливаемых деталей типа вал: диаметр — 15—250 мм, длина — 100—1200 мм. Частота вращения детали вокруг своей оси 100 мин⁻¹. Габаритные размеры установки 5000 × 3200 × 2470 мм;

— установку УИНП-30-66 для напайки твердосплавных пластин к режущим кромкам дисковых фрез и пил, сверл и резцов. Напайка производится без нарушения структуры материала нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). Возможно использование для ТВЧ обработки поверхностей деталей, высокочастотной пайки (сварки) тонкостенных труб и профилей, ТВЧ — обработки проволоки и тонкой ленты. В состав установки входят полупроводниковый генератор высокой частоты с цифровой системой регулирования параметров режима нагрева, приспособление

быстрого крепления и подачи инструмента в зону нагрева, телескопический упор из огнеупорного материала, педаль для включения и выключения нагрева, пирометрическая система измерения и регулировки температуры в зоне нагрева. Время единичного цикла пайки 5—30 с, потребляемая мощность 30 кВт, КПД генератора 95 %, расход охлаждающей воды при температуре 20 °С составляет 0,8 м³/ч. Габаритные размеры установки 1300 × 700 × 1300 мм, масса 300 кг. Установки УИНП применяются для замены громоздких и морально устаревших ламповых и электромашинных генераторов.

ОАО "Уральское производственное предприятие "Вектор" (Екатеринбург) демонстрировало на выставке аппарат МПУ-103-УЗ для ручной воздушно-плазменной резки черных и цветных металлов, коррозионно-стойких сталей толщиной 0,2—25 мм. Аппарат состоит из источника питания, плазменного резака, наборов сопел и электродов в количестве 25 шт. каждый, кабелей для подключения плазменного резака длиной до 20 м и для заземления — длиной 10 м. Длина шланга для подачи воздуха 6 м. Питающее напряжение аппарата 380 В, плазмообразующий газ — воздух, охлаждение плазменного резака и источника питания — воздушно-принудительное, потребляемая мощность 12 кВт, расход сжатого воздуха при работе до 9 м³/ч. Габаритные размеры 840 × 576 × 912 мм, масса 140 кг, масса резака 0,2 кг.

Инженерно-технический центр ЗАО "КЕМЕТ" (Санкт-Петербург) предложил потребителям оборудование для переработки металлической стружки:

— *измельчитель металлической стружки KB49* (рис. 1) для измельчения



Рис. 1. Измельчитель металлической стружки KB49

длинной витой стружки за счет трения витков друг о друга, без резания или ударов, что позволяет расходовать минимум энергии при очень небольшом износе рабочих частей. Стружку дробят перед осушением в центрифуге и брикетированием. Измельчитель перерабатывает стружку из углеродистой, легированной, коррозионно-стойкой сталей, латуни, алюминиевых и титановых сплавов. Дробилка загружается периодически ковшем или постоянно конвейером. В отличие от молотковых дробилок такая дробилка работает с большими скрученными мотками стружки. Производительность дробилки 5—8 т/ч, мощность привода 37 кВт, масса 6,5 т;

— *горизонтальную центрифугу НД100*, также предназначенную для переработки стружки. Она работает следующим образом. Смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ) и стружка разделяются в горизонтально подвешенном барабане, где СОЖ отводится через клиновой решетчатый экран. Все компоненты центрифуги доступны. Очистка барабана занимает 5—6 мин, что гораздо меньше по сравнению с другими центрифугами, у которых на это требуется 3—4 ч. Опорожнение центрифуги в автоматическом режиме после каждого технологического цикла позволяет легко чистить ее для последующей обработки стружки из другого материала. Производительность центрифуги: по стальной стружке — 4—6 т/ч, алюминиевой — 900—1500 кг/ч, чугунной — 3—5 т/ч. Мощность привода 18,5 кВт.

Компания "ТермоТехно" (Москва) демонстрировала *анализатор металлов ARL 3460* для проведения быстрого и точного анализа металлов, укомплектованной системой автоматизации SMS-2000 и работающей в автоматическом режиме, без участия оператора. Манипулятор перемещает пробу из автомата подготовки проб в штативе спектрометра и выполняет нужное число измерений. Чистка электрода, регистрация проб, измерение контрольных и установочных проб, сдвиг проб между измерениями и передача полученных результатов измерений выполняются по заданной программе. Анализатор работает при температуре окружающей среды 16—30 °С при относительной влажности до 80 %. Питающее напряжение анализатора 220 В, потребляемая мощность 3,5 кВт, габаритные размеры 1665 × 910 × 1190 мм, масса 450 кг.

ОАО "АвтоВАЗ" (Тольятти) предложил потребителям следующие разработки:

— *автоматизированную установку* для плазменной напайки жаростойких сплавов на основе железа, никеля или кобальта на рабочую фаску выпускных клапанов двигателей внутреннего сгорания. Она состоит из наплавочного блока, работающего в автоматическом режиме, и систем загрузки, выгрузки, подачи газов и охлаждения. Применение технологии плаз-

менной наплавки порошковыми сплавами позволяет сократить расход наплавляемого материала и снизить припуски под последующую механическую обработку. Наплавка модулированным током существенно повышает устойчивость процесса и качество наплавляемых слоев;

— *магнитно-импульсную установку* для сварки, формовки, сборки, резки, опрессовки и редуцирования тонкостенных трубчатых деталей любых диаметров с толщиной стенки 0,5—5 мм. Возможна качественная сварка трубчатых деталей из однородных или разнородных материалов, плохо свариваемых или не свариваемых традиционными способами сварки (Al + Al, Al + Cu, Al + Fe, Cu + Fe и др.). Производительность установки 2—20 циклов/мин, удельные затраты энергии при сварке 20—30 Дж/мм², питающее напряжение установки 380 или 220 В;

— *ультразвуковую установку* для деформационного упрочнения деталей и инструмента. После обработки на установке повышается усталостная и ударно-циклическая прочность в 2—5 раз, контактная выносливость деталей и инструмента — в 2—4 раза, износостойкость и задиростойкость — в 1,5—2 раза. При этом экономия дорогостоящих сталей и сплавов увеличивается в 2—3 раза;

— *переносную установку УДКС-605* в комплекте с автоматическим загрузчиком для присоединения дугоконтактной сваркой болтов, шпилек или штифтов к различным деталям с толщиной стенки 0,6 мм и более. Установка обеспечивает быструю и надежную сварку крепежных элементов. Система управления источником питания, выполненная на базе микроконтроллера, позволяет управлять дополнительными устройствами (автоматическим загрузчиком, клапаном газа), обеспечивает динамическое авторегулирование тока и энергии сварки, индикацию фактических значений тока, напряжения и времени сварки. Питающее напряжение установки 380 В, диапазон регулирования сварочного тока 100—800 А. Производительность установки при приварке болтов 25 шт./мин, длина кабеля сварочного пистолета 3 м. Габаритные размеры: источника питания — 610 × 350 × 320 мм, загрузчика — 720 × 560 × 310 мм; масса сварочного пистолета 4,1 кг. Автоматический загрузчик рассчитан на использование приварных болтов диаметром 3—8 мм и длиной 10—30 мм. Применение автоматического загрузчика позволяет повысить производительность сварки и обеспечивает возможность использования установки в составе автоматической сварочной линии.

Промышленная группа "Дюкон" (Москва) демонстрировала на выставке шлифовальные станки, разработанные за рубежом:

— *бесцентровый двухголовочный станок 128D*, разработанный в Италии (рис. 2), для труб (прутка) круглого и прямоугольного сечения и полосовых заготовок. На станке выполняют обдирку, шлифовку при правильном подборе последовательности шлифовальных лент нужной зернистости, а также полировку заготовок



Рис. 2. Технологическая линия — станки 128D для шлифования длинномерных труб

круглого сечения диаметром 10—150 мм, массой до 20 кг. Заготовку поддерживает регулируемая по высоте V-образная направляющая со щетками. Производительность станка 700 м³/ч на каждую обрабатываемую головку. Каждая шлифовальная головка оснащена контактным колесом, на которое надевается абразивный ремень, прижимное приводное колесо и поддерживающий ролик. Ролик устанавливается близко к контактному колесу, поддерживает заготовку и толкает ее в сторону прижимного колеса. Для работы с трубами диаметром 10—25 мм используется поддерживающий ролик диаметром 12 мм, при диаметре трубы 25—60 мм — ролик диаметром 20 мм. При попадании трубы или прутка в рабочую зону станка они начинают быстро вращаться вслед за движением абразивного ремня. Приводное прижимное колесо балансирует контактное колесо, снижая высокую частоту вращения заготовки, а также толкает трубу (пруток) в направлении, нужном для обработки. Мощность привода станка 3,3 кВт, размер шлифовальной ленты 2000 × 75 мм. Длина обрабатываемых труб 150—2000 мм, масса — до 20 кг. Габаритные размеры станка 1500 × 1460 × 1480 мм, масса 250 кг;

— *станок-полуавтомат SG 150K*, разработанный в Германии, для шлифовки полосовых металлических заготовок шириной 300 мм и труб прямоугольного сечения одной абразивной лентой. Он оборудован небольшим конвейером, работающим с регулируемой скоростью 1—10 м/мин. Местонахождение шлифовальной головки также регулируется по высоте. Подача СОЖ осуществляется об резиновыми роликами. Натяжение шлифовального ремня размером 150 × 2000 мм осуществляется специальными пружинами. Мощность приводного двигателя станка 4 кВт, питающее напряжение 400 В, габаритные размеры 1200 × 900 × 1900 мм, масса 650 кг.

Фирма MF Metalforme (Москва) демонстрировала на выставке технологическую линию ALPI-ESA (рис. 3) с ЧПУ для резки, прошивки и штамповки рулонированных материалов. Такая линия полностью заменяет традиционную прошивную установку, линию поперечной резки, установку плазменной резки. Так как процесс обработки начинается непосредственно с рулона, из технологического процесса исключается операция раскроя листа, а так-



Рис. 3. Технологическая линия ALPI-ESA

же операции загрузки и выгрузки заготовок — все эти операции выполняются машиной в автоматическом режиме. На рабочую головку можно установить до шести инструментов. Машина оснащена высокоскоростной автоматической системой смены инструмента в рабочей головке, управляемой ЧПУ (операция смены инструмента занимает 1 с). Каждый из шести инструментов имеет возможность поворота на 360°, также контролируемого с помощью ЧПУ. Использование специального профилирующего инструмента позволяет выполнять маркировку заготовок, вытяжку деталей, формирование ребер и профильных кромок, а также разметку осей для последующей гибки. Питающее напряжение технологической линии 380 В, потребляемая мощность 6 кВт, толщина обрабатываемого металлического листа 2 мм, габаритные размеры технологической линии 1900 × 1500 × 2100 мм, масса 3,5 т.

Компания "Вебер Ко Механик" (Москва) предложила потребителям машины контактной стыковой и рельефной сварки, разработанные в Германии:



Рис. 4. Машина BAS 210

— машину BAS 210 стыковой контактной сварки оплавлением (рис. 4) для производства сварных ленточных пил по дереву, биметаллических и легированных ленточных пил по металлу, ленточных ножей по текстилю, коже, поролону и т. п. Машина обеспечивает стабильное качество воспроизведения параметров сварки, отжига и, как следствие, сварного шва; высокую производительность; контроль всех параметров сварки и отжига. На машине изготавливают ленточные пилы: по металлу — шириной 35—105 мм, толщиной 0,90—1,65 мм; по дереву — шириной 35—206 мм, толщиной 0,4—1,6 мм; из коррозионно-стойкой стали — шириной 30—80 мм, толщиной 0,6 мм; ленточных ножей — шириной 40—120 мм, толщиной 0,6—1,3 мм. Мощность привода машины при ПВ 50 % составляет 70 кВт. Габаритные размеры машины в упаковке 1350 × 900 × 1600 мм, масса 620 кг;

— координатный промышленный робот (ПР) точечной и рельефной сварки в кондукторах CSR 302 (рис. 5) для производства плоских и объемных сварных конструкций из проволоки и листового металла (коррозионно-стойкой стали и алюминиевых сплавов). Поворотный стол ПР обеспечивает непрерывность сварочных работ за счет одновременно осуществляемых операций сварки на одной стороне стола и укладки заготовок в кондуктор на другой стороне. Модульная конструк-



Рис. 5. Координатный промышленный робот точечной и рельефной сварки в кондукторах CSR 302

ция ПР позволяет легко адаптировать его под новые задачи. ПР оснащен 512 сварочными программами. ЧПУ SINUMERIK на базе 32-битного чипа обеспечивает перемещения сварочной головки с точностью $\pm 0,2$ мм. Максимальные размеры: высота обрабатываемого изделия 400 мм, длина — 2000 мм, ширина — 1000 мм. Робот оснащен тремя сварочными головками с углом поворота $\pm 90^\circ$. Максимальный сварочный ток 45 кА при ПВ = 15 %. Сварочное усилие пневмоцилиндра 5 кН.

Компания Innov-Xsys (США) предложила специалистам *анализатор металлов Alpha Series* для подтверждения марки, проверки и водного контроля метал-

лов. Анализатор оснащен рентгеновской трубкой, являющейся источником возбуждения и детектором высокого разрешения. Управление осуществляется с помощью портативного компьютера HPiPAQ. Анализатор менее чем за 2 с идентифицирует коррозионно-стойкую и низколегированную стали, сплавы на основе титана, никеля, кобальта, меди и др. Анализирует также неровные и горячие металлические поверхности; измеряет труднодоступные места, изгибы труб, угловые сварные швы, фланцы, припои. Такой анализатор может работать в жестких производственных условиях. Миниатюрная трубка с противоударным креплением обеспечивает надежность прибора при эксплуатации. Включение и выключение анализатора производится триггером, расположенным на ручке. Время работы аккумуляторов 8 ч. Он оснащен цветным сенсорным дисплеем высокого разрешения, обеспечивающим четкое представление результатов при любых условиях освещения. Масса анализатора вместе с аккумулятором 1,6 кг. Анализатор переносится в удобной поясной сумке-кобуре.

Выставка вызвала большой интерес у специалистов. В ее рамках были организованы "круглые столы", презентации и научные конференции.

А. Н. ИВАНОВ, инж.

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.

Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 05.03.2007. Подписано в печать 16.04.2007. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 14,36. Заказ 05/07.

Отпечатано в типографии издательства "Фолиум", 127238, Москва, Дмитровское ш., 58, тел./факс: (495) 482 5590.

Подписные индексы журнала "Технология машиностроения":

79494 в каталоге Агентства "Роспечать"

27869 в Объединенном каталоге "Пресса России"

60190 в каталоге "Почта России"