



ТЕХНОЛОГИЯ

МАШИНОСТРОЕНИЯ

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

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:**

Гл. редактор

В. А. Казаков

Зам. гл. редактора

Н. В. Посметная

Н. П. Бирюкова

Р. С. Голов

В. Д. Горбач

С. Н. Григорьев

Б. В. Гусев

А. В. Дуб

В. М. Ермаков

А. С. Зубченко

А. В. Иванайский

Е. А. Калашников

В. В. Капустин

А. Л. Карунин

И. П. Ксенович

А. Е. Лигачев

А. А. Лозован

В. П. Лялякин

А. В. Медарь

Б. А. Никитин

Г. В. Самодуров

В. Н. Семенов

О. С. Сироткин

А. К. Скворчевский

Н. В. Смирнов

А. В. Телушкин

А. Н. Феофанов

В. А. Фролов

В. К. Шелег

И. Н. Шиганов

Редакция:

С. В. Богус,

Л. Т. Мартыненко,

Т. П. Маслик

Компьютерная верстка:

Е. В. Конова

Дизайн обложки:

Е. С. Благовидов

Специальные

корреспонденты:

А. Н. Иванов, А. В. Казаков,

Ан. А. Суслов

Редактор-переводчик

Е. О. Егорова

Корректор

Е. В. Комиссарова

**9 (75)
Сентябрь
2008**

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Издательский центр

"Технология машиностроения"

Журнал издается при содействии

Министерства промышленности

и торговли РФ,

Министерства образования и науки РФ,

Российской инженерной академии,

Союза машиностроителей России,

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

Адрес для корреспонденции:

129626, Москва, а/я 01

Контактный тел.: (495) 796 2491

Бухгалтерия: 8 910 414 9184

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



TEKHNLOGIYA MASHINOSTROENIYA

REVIEW-ANALYTICAL, SCIENTIFIC-TECHNICAL
AND PRODUCTION JOURNAL

**EDITORIAL
BOARD:**

V. A. Kazakov
Editor-in-Chief

N. V. Posmetnaya
Deputy Editor-in-Chief

N. P. Biryukova
R. S. Golov
V. D. Gorbach
S. N. Grigoryev
B. V. Gusev
A. V. Dub
V. M. Ermakov
A. S. Zubchenko
A. V. Ivanaysky
E. A. Kalashnikov
V. V. Kapustin
A. L. Karunin
I. P. Ksenevich
A. E. Ligachev
A. A. Lozovan
V. P. Lyalyakin
A. V. Medar
B. A. Nikitin
G. V. Samodurov
V. N. Semenov
O. S. Sirotkin
A. K. Skvorchevsky
N. V. Smirnov
A. V. Telushkin
A. N. Feofanov
V. A. Frolov
V. K. Sheleg
I. N. Shiganov

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

Computerized making-up:
E. V. Konova

Cover design:
E. S. Blagovidov

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

Editor-translator
E. O. Egorova

Proof-reader
E. V. Komissarova

**9 (75)
September
2008**

FOUNDER:

Publishing Centre

"Tekhnologiya Mashinostroeniya"

Journal is published in collaboration
with RF Ministry of Industry and Trade,
RF Ministry of Education and Science,
Russian Engineering Academy,
The Union of machine engineers
of Russia
TSNIITMASH, JSC

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

Tel.: (495) 796 2491

Book-keeping: 8 910 414 9184

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

СОДЕРЖАНИЕ

Городилов А. А., Синенко Е. Г., Сорокин Е. А. — Механико-технологический факультет Сибирского федерального университета. Этапы развития	5
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ	
Темных В. И., Казаков В. С., Митяев А. Е., Темных Е. В. — Модели формирования композиционных структур припоев на основе галлия в процессе затвердевания	9
ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	
Черепанов А. И., Бабкин В. Г. — Расчет литейной усадки алюминиевых сплавов и композиционных материалов	12
Токмин А. М., Теремов С. Г., Масанский О. А. — Исследование структуры и свойств слоя, полученного индукционной наплавкой металлических порошков.	15
ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ, ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ	
Машрабов Н. — Моделирование тепловых полей при механической обработке металлов численным методом.	19
Федоренко М. А. — Способ обработки цилиндрических поверхностей при базировании на эллиптических базах.	21
Дуюн Т. А., Гринек А. В. — Особенности токарной обработки поверхности коллекторов электродвигателей постоянного тока	25
СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	
Демин В. Г., Пикалов Я. Ю., Шатохин С. Н. — Проектирование адаптивных гидростатических опор для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков.	27
Гордеев Ю. И., Абкарян А. К., Зеер Г. М. — Перспективы использования нанопорошков для повышения эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента	31
Шереметьев К. В. — Вспомогательный инструмент для технологической модернизации фрезерных станков.	35
ТЕХНОЛОГИИ И МАШИНЫ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ	
Новосельцев Ю. Г., Черных Е. А., Туф С. М. — Исследование условий для эффективной работы плазмы в сварочных процессах	38
Петецкий В. Н., Петецкий Н. В. — Фазовая динамика в условиях сварки с ограниченным количеством шлака конструкций ответственного назначения.	40
Михеев А. А., Прокопьев С. В. — Влияние защитной среды на стехиометрический состав пьезокерамики при диффузионной сварке	46
СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ	
Корчагин А. И., Зубрилов Г. Ю. — Перспективы применения коллоидных растворов в качестве смазочных материалов при квазистатическом трении скольжения	49
МЕТРОЛОГИЯ И МЕТРОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ	
Малышев Ю. О. — Калибраторы серии КС — переносная поверочная лаборатория, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р 8.624—2006	51
ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ	
Гузев В. С., Шумячер В. М. — Повышение эффективности алмазного хонингования деталей гидроаппаратуры за счет выбора рациональных режимов обработки	54
ЭНЕРГЕТИКА	
Мордынский В. Б., Тюфтяев А. С., Тазикова Т. Ф., Хачатурова А. Г. — Возможности плазменных технологий для повышения ресурса теплоэнергетического оборудования (обзор)	57
МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ, ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ И КОМПЛЕКСЫ ПРОГРАММ	
Докшанин С. Г., Докшанина И. И. — Моделирование контактных напряжений на поверхности качения с учетом сил трения.	62
Синенко Е. Г., Абазин Д. Д., Конищева О. В. — Кинематика и динамика зубчатого эксцентричного дифференциала.	64
Вячеславова О. Ф., Потапов В. Н., Иванайский А. В. — Применение информационных технологий для контроля параметров поверхности изделия ракетно-космической техники.	66
СТАНДАРТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОДУКЦИИ	
Бирюков Г. П., Блатиков Г. А., Торпачев А. В. — Анализ качества стартовых комплексов с использованием системных показателей.	69
ЭКОНОМИКА МАШИНОСТРОЕНИЯ, ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	
Соловьева И. П., Асаева Т. А. — Сокращение логистических затрат на стадии формирования транспортных подразделений машиностроительных предприятий.	73
ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ	
Потапова Г. С. — Содержание зарубежных журналов.	75
ИНФОРМАЦИЯ	
Иванов А. Н. — 12-я Международная специализированная выставка "Интерлакокраска—2008"	78

CONTENTS

Gorodilov A. A., Sinenko Ye. G., Sorokin Ye. A. — Mechanics and technology department. Periods of development 5

STRUCTURAL MATERIALS, METAL SCIENCE

Temnykh V. I., Kazakov V. S., Mityayev A. Ye., Temnykh Ye. V. — Models of the solder gallium-based composite structures formation at solidification 9

BLANK PRODUCTION

Cherepakhov A. I., Babkin V. G. — Casting shrinkage calculation of alloys and composite materials 12

Tokmin A. M., Teremov S. G., Masansky O. A. — Study of the factors which determine structure and properties of the layer obtained as a result of metal powder induction overlaying 15

TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT FOR MACHINING, PHYSICOTECHNICAL PROCESSING, NON-CUTTING SHAPING

Mashrabov N. — Numerical modelling of thermal fields at metal machining. 19

Fedorenko M. A. — Cylindrical surfaces processing method at their basing on the elliptical bases 21

Duyun T. A., Grinek A. V. — Turning features of the dc motor reservoir current collecting surface 25

TOOLING PRODUCTION

Diomin V. G., Pikalov Ya. Yu., Shatokhin S. N. — Design of adaptive hydrostatic bearings with floating regulators for lubricant feeding spindle assembly and slideways of the metal-cutting equipment 27

Gordeyev Yu. I., Abkaryan A. K., Zeyer G. M. — Nano-powders usage prospect to improve physical-mechanical and service properties of the cemented carbide tool. 31

Sheremetev K. V. — Auxiliary tool for the milling machine processing retrofit 35

TECHNOLOGIES AND MACHINES FOR WELDING PRODUCTION AND RELATED PROCESSES

Novoseltsev Yu. G., Chernykh Ye. A., Toof S. M. — Investigation of conditions for stable and effective plasma work at welding processes 38

Petetsky V. N., Petetsky N. V. — Phase dynamics under welding conditions of slag limited quantity of high-duty constructions 40

Mikheyev A. A., Prokopyev S. V. — Effect of the welding chamber shielding medium on the stoichiometric composition of piezoceramics at diffusion welding 46

SPECIAL TECHNOLOGIES

Korchaguin A. I., Zoobrilov G. Yu. — Prospect of colloidal solutions as lubricants at quasi-static sliding friction. . . . 49

METROLOGY AND MEASUREMENT ASSURANCE

Malyshev Yu. O. — Calibrators of the KC series as portable calibration laboratory meeting the requirements of GOST P 8.624—2006 51

INSTRUMENT-MAKING TECHNOLOGIES

Guzev V. S., Shoomyacher V. M. — Diamond honing effectiveness increase of the hydraulics components due to efficient processing conditions choice. 54

POWER ENGINEERING

Mordynsky B. V., Tyufyayev A. S., Tazikova T. F., Khachatoorova T. F. — Plasma technology potential to increase heat-and-power engineering equipment resource 57

MATHEMATICAL MODELLING, CALCULUS OF APPROXIMATIONS AND SOFTWARE SYSTEMS

Dokshanin S. G., Dokshanina I. I. — Contact stress designing on the rolling surface taking into consideration friction forces 62

Sinenko Ye. G., Abazin D. D., Konischeva O. V. — Kinematics and dynamics of the rack-type eccentric differential. . . . 64

Vyacheslavova O. F., Potapov V. N., Ivanaysky A. V. — Application of the informational technologies to control quality and characteristics of the product surface of rocket and space engineering 66

STANDARDIZATION AND PRODUCT QUALITY CONTROL

Biryukov G. P., Blatkov G. A., Torpachev A. V. — Launch complexes quality analysis using system indices 69

ECONOMICS OF THE ENGINEERING INDUSTRY AND PRODUCTION ORGANIZATION

Soloviova I. P., Asayeva T. A. — Logistic costs reduction at the stage of forming transport subdivisions at a machine-building enterprise 73

FOREIGN EXPERIENCE

Potapova G. S. — Contents of the foreign journals 75

INFORMATION

Ivanov A. N. — The 12th International specialised exhibition "Interpaintwork—2008" 78

А. А. ГОРОДИЛОВ, канд. техн. наук, Е. Г. СИНЕНКО, канд. техн. наук,
Е. А. СОРОКИН, канд. техн. наук,
Сибирский федеральный университет

Механико-технологический факультет Сибирского федерального университета. Этапы развития



Декан МТФ, канд. техн. наук Е. А. Сорокин

В конце 50-х гг. XX века в хозяйственном комплексе Красноярского края начали активно формироваться новые и более высокими темпами развиваться существующие отрасли: машиностроение, энергетика, приборостроение, металлургия, химическое производство, строительство, транспорт и др. Росло число предприятий ВПК, создавались новые научно-исследовательские институты и проектные организации. В связи с этим в крае резко возросла потребность в инженерно-технических кадрах различных специальностей. В целях удовлетворения этой потребности по постановлению Правительства СССР № 1043 от 04.08.56 г. в Красноярске был создан Красноярский политехнический институт. Новый вуз возглавил канд. техн. наук В. Н. Борисов, профессор, впоследствии почетный гражданин Красноярска.

Первый набор студентов был осуществлен в 1956 г. по трем специальностям, одна из которых "Технология машиностроения, металлорежущие станки и инструменты". С этой специальности началось создание и развитие механического, а с 1980 г. — механико-технологического факультета. Первым

деканом МФ, официально открытого в 1958 г., стал Г. И. Чистяков.

Факультет в то время осуществлял подготовку инженеров по трем специальностям: "Технология машиностроения", "Электрификация промышленных предприятий" и "Эксплуатация автомобильного транспорта". Первыми кафедрами механического профиля, ставшими основой факультета, были кафедры "Техническая механика" во главе с основателем и первым ректором института В. Н. Борисовым и "Технология металлов и материалов", которую возглавлял первый в институте д-р техн. наук И. Ф. Афонский.

В мае 1959 г. организована первая выпускающая кафедра "Технология машиностроения", которую возглавил С. Е. Баннов.

В октябре 1962 г. на факультете открыта общинженерная кафедра "Гидравлика", которую возглавил канд. техн. наук А. М. Караваев. За время своего существования по мере изменения содержания преподаваемых дисциплин она меняла свое название. В настоящее время это выпускающая кафедра "Гидропривод и гидропневмоавтоматика".

В 1963 г. на факультете создана еще одна общинженерная кафедра "Детали машин", призванная реализовать в учебном процессе подготовку студентов по дисциплинам проектно-конструкторского цикла. Кафедру возглавил канд. техн. наук И. И. Родин. Сегодня это выпускающая кафедра "Проектирование и экспериментальная механика машин".

Становление общинженерных кафедр продолжалось в 1967 г., когда на базе кафедры "Техническая механика" была образована кафедра "Сопротивление материалов" во главе с д-ром техн. наук Л. И. Маламентом. С 1988 г. кафедра носит название "Динамика и прочность машин". Плодотворное сотрудничество кафедры с Вычислительным центром СО РАН позволило в 1995 г. открыть базовую кафедру "Диагностика и безопасность технических систем" во главе с д-ром техн. наук В. В. Москвичевым.

В 1973 г. на факультете образована общинженерная кафедра "Теория механизмов и машин", которую возглавил канд. техн. наук А. Г. Мартынов. В последующем в связи с передачей на кафедру ряда общинженерных дисциплин изменилось содержание ее работы, что повлекло изменение на-

звания на новое — "Теория и конструирование механических систем".

В 1961 г. кафедра "Технология металлов и материалов" начала подготовку инженеров по специальности "Технология производства сварных конструкций". В перспективе это привело к необходимости организации соответствующей кафедры "Оборудование и технология сварочного производства", которую открыли в 1969 г. Ее возглавил В. В. Ожегин.

В 1975 г. были организованы кафедра "Машины и технология литейного производства" во главе с канд. техн. наук Н. В. Гришковым и кафедра "Машины и технология обработки металлов давлением" во главе с канд. техн. наук И. П. Талашкевичем. Жизнь внесла свои коррективы, и в 1992 г. произошло объединение кафедр. Новая кафедра получила название "Литейное производство и обработка металлов давлением". Ее возглавил В. Г. Бабкин.

Не останавливались все эти годы в своем развитии и самые первые кафедры.

Кафедра "Технология металлов и материалов", приобретая все более универсальный характер, перешла в статус кафедры "Материаловедение и технология конструкционных материалов". С 1994 г. она выпускающая, осуществляя подготовку инженеров-педагогов специализации "Материаловедение и обработка материалов".

Кафедра "Техническая механика" была плацдармом для образования изначально общеинженерных кафедр. От нее в разные годы получили становление и развитие шесть общеинженерных кафедр института и в 1973 г. ее переименовали в кафедру "Теоретическая механика", переведя тем самым в разряд естественно-научных кафедр. Однако научные традиции, заложенные основателем кафедры В. Н. Борисовым, дали возможность кафедре стать выпускающей и в настоящее время она носит название "Теоретическая механика и триботехника".

В 2003 г. в связи с открытием новых специальностей на базе кафедры "Технология машиностроения" была создана выпускающая кафедра "Стандартизация и управление качеством".

Факультет в силу своих потенциальных возможностей стал устойчивой системообразующей структурой института. И заслуга в этом его лидеров — деканов разных лет Г. И. Чистякова (1958—1962 гг.), Г. С. Елистратова (1962—1965 гг.), А. М. Караваева (1965—1979 гг.), канд. техн. наук С. Н. Шатохина (1979—1981 гг.), канд. техн. наук А. А. Городилова (1981—1996 гг.), д-ра техн. наук В. Ф. Терентьева (1996—2006 гг.).

По мере своего развития факультет претерпевал различные организационные изменения. В разные годы из него выделились в самостоятельные факультеты: автодорожный (автотранспортный), ма-

шиностроительный, естественно-научный (инженерно-физический), инженерно-педагогический.

За годы своего существования механико-технологический факультет подготовил более восьми тысяч специалистов. Многие из них достигли значительных успехов на производстве, в административной и научной деятельности; именно выпускники МТФ сыграли значительную роль в становлении и развитии машиностроительного комплекса Красноярского региона.

Сегодня механико-технологический факультет является крупнейшим факультетом Сибирского федерального университета, на котором обучаются почти 1500 студентов дневного отделения и 500 студентов заочной формы обучения. В состав факультета входят 10 кафедр: "Технология машиностроения" (заведующий кафедрой канд. техн. наук Ю. И. Гордеев), "Литейное производство и обработка металлов давлением" (д-р техн. наук В. Г. Бабкин), "Оборудование и технология сварочного производства" (канд. техн. наук Ю. Г. Новосельцев), "Гидропривод и гидропневмоавтоматика" (д-р техн. наук С. В. Каверзин), "Динамика и прочность машин" (канд. техн. наук И. А. Зырянов), "Проектирование и экспериментальная механика машин" (канд. техн. наук М. П. Головин), "Материаловедение и технология конструкционных материалов" (канд. техн. наук В. И. Темных), "Теория и конструирование механических систем" (д-р техн. наук П. Н. Сильченко), "Теоретическая механика и триботехника" (д-р техн. наук Н. В. Еркаев), "Стандартизация и управление качеством" (канд. техн. наук В. С. Секацкий), базовая кафедра "Диагностика и безопасность технических систем" (д-р техн. наук В. В. Москвичев).

Кафедры ведут подготовку по 14 специальностям, охватывающим основные отрасли машиностроения: "Технология машиностроения", "Металлорежущие станки и комплексы", "Машины и технология литейного производства", "Машины и технология обработки металлов давлением", "Технология художественной обработки материалов", "Оборудование и технология сварочного производства", "Оборудование и технология повышения износостойкости и восстановление деталей машин и аппаратов", "Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика", "Триботехника", "Динамика и прочность машин", "Системы автоматизированного проектирования (в машиностроении)", "Информационные системы и технологии (в машиностроении)", "Управление качеством", "Стандартизация и сертификация".

С 2006 г. на факультете ведется обучение бакалавров по трем направлениям: "Технологические машины и оборудование", "Материаловедение и технология новых материалов", "Технологии, оборудование и автоматизация машиностроительных производств",

а в 2008 г. планируется осуществить первый набор магистров.

Подготовку специалистов на МТФ ведут квалифицированные преподаватели. В их числе более 20 докторов наук — В. Г. Бабкин, С. В. Каверзин, В. А. Коднянко, В. И. Козлов, А. И. Корчагин, А. А. Михеев, П. Н. Сильченко, Е. Г. Синенко, С. Н. Шатохин и др.; около 80 кандидатов наук; ветераны факультета В. Е. Авраменко, М. И. Вихорева, А. А. Городилов, А. П. Курилин, Р. И. Кутчер, А. П. Рукусуев, В. И. Сенькин, Л. П. Шатохина и др.; успешно сочетающие научную и производственную работу с преподавательской деятельностью доктора наук В. К. Андреев, В. В. Вальков, Г. Г. Крушенко, В. М. Садовский; ведущие специалисты и руководители промышленных предприятий В. С. Бессонов, В. К. Вахтель, В. Г. Мельников, В. Д. Соловьев и многие другие.

Организационное развитие МТФ позволило создать шесть филиалов кафедр и одну базовую кафедру. Это дало возможность вынести часть учебного процесса на предприятия, привлечь к преподаванию ведущих специалистов, организовать требуемый уровень практики, выполнить разработку курсовых и дипломных проектов по заказам промышленности.

Большое внимание на факультете уделяется связям с промышленными предприятиями и научными организациями, без чего невозможно обеспечить поступательное развитие в сфере образовательной деятельности, постановке научных исследований, укреплении материально-технической базы. С этой целью при участии МТФ подписан договор о сотрудничестве между СФУ и Союзом машиностроителей России; в настоящее время ведется работа над соглашением о совместной деятельности между СФУ и Региональным отраслевым объединением работодателей "Союз машиностроителей и металлообрабатывающих предприятий".

Комплекс этих и ряд других мероприятий позволяют говорить о возросшем авторитете факультета среди студенчества и его выпускников. В среднем на факультете около 200 студентов учится на "хорошо" и "отлично", за последние 5 лет более 30 человек удостоены именных стипендий. Возросла востребованность в молодых специалистах. Например, по специальностям "Технология машиностроения", "Оборудование и технология сварочного производства", "Системы автоматизированного проектирования" заявки на специалистов превысили их выпуск.

В последнее десятилетие самое серьезное внимание на факультете уделяется развитию информационной среды. Сейчас в структуре ИВЦ действуют шесть компьютерных классов, в которых сосредоточено около 100 компьютеров, всего на факультете имеется более 300 компьютеров. ИВЦ располагает современными серверами, все классы и кафедры

объединены в локальную сеть с выходами в Internet и корпоративную сеть СФУ.

Развитие старейшего факультета университета невозможно без постоянной работы по омоложению кадров. Эта проблема в основном решается за счет собственных сил: на кафедрах ведется подготовка кадров высшей квалификации через аспирантуру и докторантуру по 12 научным специальностям. Сейчас в аспирантуре обучаются около 40 аспирантов, подготовкой которых руководят 25 ведущих ученых, имеющих богатый опыт научной, производственной и педагогической работы. Эффективной работе аспирантуры, несомненно, способствовал открытый на факультете в 1997 г. диссертационный совет по защитах кандидатских диссертаций (первый председатель совета — д-р техн. наук С. В. Каверзин). В настоящее время проходит процедура открытия совета по защите докторских диссертаций по специальностям "Машиноведение, системы приводов и детали машин", "Технология и оборудование сварочного производства", "Динамика и прочность машин".

На кафедрах успешно функционируют следующие научно-учебные школы ведущих научных специалистов факультета.

"Трение и износ в узлах и деталях машин" — школа функционирует и развивается более 30 лет, ее основатель — выдающийся ученый В. Н. Борисов. В дальнейшем этим направлением руководил д-р техн. наук В. Ф. Терентьев, в настоящее время руководителем школы является д-р техн. наук Н. В. Еркаев. Результаты исследований используются при разработке и эксплуатации перерабатывающего оборудования. Опубликовано свыше 250 научных работ, получены более 30 авторских свидетельств. Наиболее важные разработки запатентованы. Защищены более 30 кандидатских и докторских диссертаций, результаты исследований используются в учебном процессе.

"Гидростатические и аэростатические опоры скольжения шпиндельных узлов" — руководитель — С. Н. Шатохин. Работа выполняется с 1970 г. Указанные опоры позволяют получать малую, нулевую и отрицательную податливость, многократно повысить точность шпиндельных узлов и их быстроходность. Результаты работы экспонировались в Чехии, Словакии, Германии и отмечены медалями и дипломами, внедрены на многих предприятиях России и за рубежом. Открыта аспирантура, защищены 14 кандидатских диссертаций, получены более 50 авторских свидетельств на изобретения, опубликованы более 300 научных работ, изданы четыре межвузовских сборника научных работ.

"Методология технологического обеспечения качества в машиностроении" — основатель — д-р техн. наук В. В. Летуновский. Работа выполняется с 1965 г. Имеется аспирантура, защищены шесть кандидат-

ских и одна докторская диссертации, опубликованы более 460 научных работ, в том числе в США, Латвии, Чехии, Италии и Японии. Получены свыше 50 авторских свидетельств на изобретения. Результаты работ представлялись на 1-м Международном съезде технологов-машиностроителей, 10-й Международной конференции. В рамках данной научно-учебной школы выполнены свыше 200 исследовательских дипломных проектов. Руководитель — канд. техн. наук В. С. Секацкий.

"Механика разрушения и надежность машин и конструкций" — руководитель — д-р техн. наук В. В. Москвичев. Общая направленность работ — повышение надежности и живучести машин и конструкций в зонах умеренного и сурового климата. По результатам исследований защищены семь кандидатских и одна докторская диссертации. Открыта аспирантура по специальности "Динамика и прочность машин". Опубликовано свыше 150 работ, в Красноярске проведены восемь научных конференций и семинаров.

МТФ всегда занимал ведущие позиции в постановке научных исследований. Направление научных исследований ученых и аспирантов факультета соответствует программе научных исследований "Повышение качества изделий машиностроительного производства", составленной на основе научных исследований кафедр: разработка и исследование методов обеспечения качества в машиностроении на этапе технологической подготовки производства (руководитель — канд. техн. наук А. А. Городилов); разработка систем и устройств повышения работоспособности гидропривода самоходных машин, эксплуатируемых в условиях Сибири и Дальнего Востока (д-р техн. наук С. В. Каверзин); поверхностные явления в литейных процессах (д-р техн. наук В. Г. Бабкин); исследование и разработка оборудования и технологии плазменно-порошкового восстановления деталей механизмов и машин" (канд. техн. наук Ю. Г. Новосельцев); разработка и исследование параметров эксцентриковых механизмов преобразования и создания машин и механизмов на их базе (канд. техн. наук Е. Г. Синенко); исследование физико-механических свойств композиционных и керамических конструкционных материалов с использованием в расчетах машин и конструкций (канд. техн. наук И. А. Зырянов); оценка надежности и безопасности сложных

технических систем (д-р техн. наук В. В. Москвичев); исследования и разработка новых технологий обработки материалов (канд. техн. наук В. И. Темных); повышение качества машин на этапе проектирования за счет создания интегрированной информационной среды (канд. техн. наук М. П. Головин); бесконтактные адаптивные шпиндельные опоры и направляющие (гидростатические и аэро-статические) металлорежущих станков (канд. техн. наук С. Н. Шатохин); разработка методов, средств и технологий для обеспечения надежной эксплуатации элементов механических конструкций и сложных механических систем в течение заданного срока эксплуатации" (д-р техн. наук П. Н. Сильченко).

Над поставленными задачами работают ведущие ученые факультета, аспиранты и студенты. Полученные результаты, несомненно, найдут применение в учебном процессе при подготовке высококвалифицированных специалистов в области машиностроения, а также внесут вклад в развитие промышленных предприятий Красноярского края.

Имеющийся у исполнителей опыт и научный задел соответствуют мировому уровню в области создания и теоретического обоснования новых конструкций машин и оборудования, создания учебных программ и тренажеров для подготовки специалистов-машиностроителей.

В 2006 г. МТФ в составе Политехнического института вошел в структуру Сибирского федерального университета. Это открывает перед факультетом новые перспективы дальнейшего развития. Преподаватели факультета получили возможность повысить свою квалификацию, стажирясь в ведущих российских и зарубежных вузах, научно-исследовательских организациях, крупных предприятиях и компаниях. Уже в 2007 г. произведены закупки нового учебного и научного оборудования, вычислительной техники. Ведется работа по организации на базе факультета Центра наукоемких технологий в машиностроении.

Анализируя прошлое и настоящее факультета, вглядываясь в его будущее, можно с уверенностью сказать, что коллектив Механико-технологического факультета не потерял славные традиции, у него есть хороший потенциал для того, чтобы внести достойный вклад в развитие машиностроительного комплекса Красноярского региона.

В. И. ТЕМНЫХ, канд. техн. наук, В. С. КАЗАКОВ, канд. техн. наук,
А. Е. МИТЯЕВ, канд. техн. наук, Е. В. ТЕМНЫХ, инж.
Сибирский федеральный университет

Модели формирования композиционных структур припоев на основе галлия в процессе затвердевания

Низкая температура плавления ($29,8^{\circ}\text{C}$), уникальная способность смачивать различные материалы и низкая упругость пара позволяют использовать галлий в качестве основного компонента диффузионно-твердеющих припоев для низкотемпературной бесфлюсовой пайки разнородных материалов в различных сочетаниях при производстве радиоэлектронной, авиационной, космической и вакуумной техники.

В ряде случаев необходимо получать соединения при температуре, не превышающей $25\text{--}300^{\circ}\text{C}$. Это особенно актуально в случае монтажа электронных схем, пайки тонких пленок, получения неразъемных вакуумноплотных соединений, так как нагрев может вызвать необратимые структурные изменения, ведущие к снижению (потере) свойств соединяемых материалов и соединяемых компонентов (в том числе активных), потере вакуумной плотности, распаду ранее запаянных швов.

Применение композиционных паст-припоев на основе галлия позволяет соединять материалы даже при $18\text{--}20^{\circ}\text{C}$, может обеспечить электропроводность, вакуумную плотность, требуемый комплекс механических свойств и эксплуатацию полученных соединений при температуре до 900°C (при соответствующей термической обработке).

Наряду с несомненными достоинствами галлиевые пасты-припои имеют и существенные недостатки, ограничивающие их применение. Прежде всего это длительное время затвердевания, образующаяся диффузионная пористость и значительная стоимость.

Анализируя современные достижения в области исследования кинетики и механизмов межфазных реакций, приходится признать, что, несмотря на впечатляющие экспериментальные исследования и теоретическое описание многих процессов, данное научное направление настолько многообразно, что научных и научно-технологических проблем в этой области еще очень много. В настоящее время недостаточно исследована кинетика взаимодействия многокомпонентных и гетерогенных дисперсных систем (частиц) с жидкометаллическими расплавами, научные результаты в этой области будут полезны при разработке новых технологий пайки, сварки, наплавки, металлизации и др.

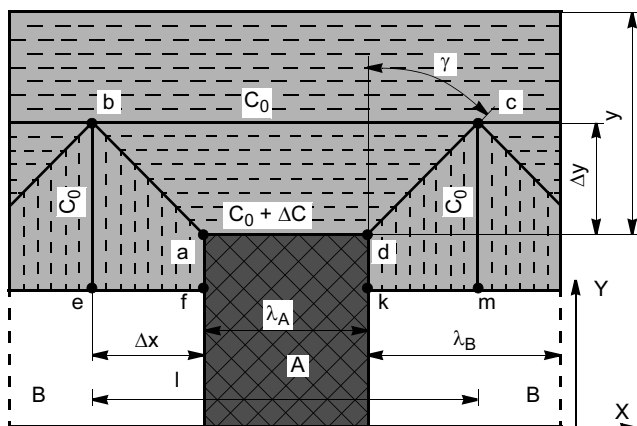
Применительно к процессам низкотемпературной пайки различных материалов определение кинетических параметров контактно-реактивного взаимодействия, установление взаимосвязи между химическим, фракционным составом, дисперсностью, структурой и свойствами паст-припоев позволит разработать новые составы и технологические режимы для обеспечения требуемого комплекса функциональных свойств соединения на протяжении всего срока службы изделия.

Анализ литературных источников показывает, что из представлений химической кинетики гетерогенных реакций и физической кинетики структурообразования реальных сплавов [1, 2] следует неравноценность процессов фазообразования на однофазных и многофазных материалах. Гранулометрический и фазовый составы наполнителя галлиевых паст-припоев будут существенно влиять на кинетику контактно-реактивного массообмена на межфазной границе в жидкометаллических суспензиях, что и подтвердили экспериментальные исследования [3, 4].

Если гетерофазная структура частиц сплава-наполнителя ускоряет процесс образования новых фаз на границе раздела с жидким галлием, то присутствующий "третий" компонент может оказывать как ускоряющее, так и замедляющее действие.

Стремление получить универсальные расчетные модели кинетики взаимодействия многофазных сплавов с металлическими расплавами ограничивается тем, что процессы диффузии для многофазных (гетерогенных) систем различаются исключительной сложностью. На этот процесс накладывает свое влияние целый комплекс таких факторов, как химический состав и природа материалов матрицы и наполнителя, их относительная доля, дисперсность наполнителя, термические эффекты и др. Поэтому на данном этапе наиболее рациональным представляется подход к решению поставленных задач через существенные упрощения как в исходной структуре материала частиц наполнителя, так и в структуре образующихся интерметаллидов на границе раздела между жидкой фазой и частицами наполнителя.

Можно предложить модель кинетики массопереноса на границе многофазный твердый сплав — жидкость, где твердое тело имеет структуру пластинчатой эвтектики. В этом случае достаточно представ-



Модель к расчету скорости роста новых фаз в двухфазном сплаве

лений о периодическом изменении концентраций компонентов вдоль границы раздела, так как ориентация структурных составляющих эвтектики практически не влияет на параметры массопереноса [3, 5]. Это обстоятельство позволяет использовать для теоретического анализа наиболее удобные ориентации, например, когда периодичность концентраций у границы раздела наблюдается в направлении только одной оси пространственных координат.

Для удобства рассмотрения здесь можно выделить несколько зон (см. рисунок): первая зона толщиной Δy , в которой происходят релаксационные процессы (выравнивание концентраций вдоль границы раздела); вторая — толщиной $(y - \Delta y)$, в которой подвод (отвод) диффундирующих атомов происходит только в направлении к границе (от границы) раздела.

Часть объема материала, в котором функционируют релаксационные процессы у данной пластины в направлении оси Y , в первом приближении может быть заменена некоторой фигурой с сечением $abcd$ и длиной (пластины) L с изоконцентрационными поверхностями, параллельными принимаемой плоской границе раздела.

В этом случае из первого закона Фика имеем

$$Q = -D_A \frac{dC}{dy} S, \quad (1)$$

где Q — количество вещества, продиффундировавшего в единицу времени через любое горизонтальное сечение S данной фигуры при градиенте концентраций в данном сечении dC/dy и коэффициенте диффузии D (анализ выполняется для фазы A).

С другой стороны, можно написать

$$-\int_0^{\Delta y} \frac{dy}{S(y)} dy = (C_0 + \Delta C) - C_0 = \Delta C, \quad (2)$$

где C_0 — концентрация компонента (A или B) на расстоянии Δy и Δx от границы раздела исходной дисперсной фазы, одинаковая по всей плоскости (поверхности); ΔC — перепад концентрации компонента (A или B) от равновесной на границе раздела соответственно фаз A и B до гомогенных по составу линий (плоскостей) C_0^A и C_0^B .

Объединив уравнения (1) и (2), произведя интегрирование и перейдя на объемные доли фаз в сплаве, получим, что эффективная скорость роста новой фазы (плотность диффузионного потока) у фазы A эвтектического сплава в направлении оси Y

$$V_{\text{эвт}_y}^A = D_A \frac{\Delta C}{\Delta y} \frac{F_B}{F_A \ln\left(\frac{1}{F_A}\right)}, \quad (3)$$

где F_A и F_B — объемные доли фаз в сплаве-наполнителе.

Другая часть объема материала, в котором функционируют релаксационные процессы, может быть заменена двумя одинаковыми зонами с сечениями $abef$ и $dcmk$ и длиной (пластины) L с изоконцентрационными поверхностями, параллельными границе раздела фаз в эвтектическом сплаве.

Проведя анализ для этих зон, аналогичный зоне $abcd$, и допуская, что $af = \lambda_A/2$, $be = \lambda_B/2$ ($\tan \gamma \approx 1$) (λ_A, λ_B — толщина пластины фаз A и B соответственно), получим два идентичных выражения, соответствующих эффективной составляющей скорости образования новой фазы на фазе A эвтектического сплава в направлении оси X слева и справа от пластины A , что в сумме даст боковую плотность диффузионного потока, равную плотности диффузионного потока в направлении оси Y . Общая плотность диффузионного потока по компоненту A

$$V_{\text{эвт}_{y,x}}^A = 2D_A \frac{\Delta C}{\Delta y} \frac{F_B}{F_A \ln\left(\frac{1}{F_A}\right)} = 2D_A \frac{\Delta C}{\Delta y} T_a. \quad (4)$$

Сомножитель T правой части выражения (4), равный, например, для фазы A $F_B/F_A \ln(1/F_A)$, отражает особенности роста новых фаз на дисперсных фазах эвтектического сплава, обусловленные геометрическими факторами (появлением дополнительных путей диффузии по сравнению с ростом новых фаз на гомогенном веществе).

Аналогично выражению (4) по компоненту B

$$V_{\text{эвт}_{y,x}}^B = 2D_B \frac{\Delta C}{\Delta y} \frac{F_A}{F_B \ln\left(\frac{1}{F_B}\right)}. \quad (5)$$

Таблица 1

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя x , мм			
	x_{Cu}	x_{Ag}	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (эксперимент)	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (расчет)
50	0,008	0,320	0,560	0,560
100	0,025	0,405	0,705	0,728
150	0,060	0,580	1,100	1,074
200	0,085	0,730	1,400	1,364
250	0,130	1,000	1,900	1,888

Таблица 2

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя x , мм			
	x_{Cu}	x_{Ag}	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (эксперимент)	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (расчет)
50	0,020	0,400	0,650	0,760
100	0,050	0,650	1,200	1,240
150	0,100	0,820	1,500	1,620
200	0,170	1,100	2,100	2,200
250	0,220	1,400	2,800	2,600

Таблица 3

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя x , мм			
	x_{Cu}	x_{Ag}	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (эксперимент)	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (расчет)
50	0,030	0,510	0,950	0,914
100	0,060	0,800	1,450	1,452
150	0,125	1,150	1,980	2,138
200	0,185	1,350	2,500	2,560
250	0,250	1,750	3,350	3,334

Формула суммарной эффективной скорости роста новых фаз на эвтектическом (двухфазном) сплаве по правилу аддитивности может быть записана в виде

$$V_{\text{эвт}}^{A-B} = 2 V_{\text{эвт}, y, x}^A \frac{F_B}{\ln\left(\frac{1}{F_A}\right)} + 2 V_{\text{эвт}, y, x}^B \frac{F_A}{\ln\left(\frac{1}{F_B}\right)}. \quad (6)$$

Полученное выражение (6) позволяет проводить приблизительный количественный анализ скорости диффузии компонентов сплава-наполнителя припои через слой образующихся интерметаллидов.

В табл. 1—6, кроме экспериментальных данных для толщины слоев интерметаллидов x_{Cu} , x_{Ag} , $x_{(\text{Cu—Ag})}$, при разных температурах и времени изотермической выдержки (5, 10, 15, 20, 25 и 30 ч соответственно) приведены расчеты $x_{(\text{Cu—Ag})}$ по формуле (6) исходя из экспериментально полученных значений x_{Cu} , x_{Ag} в приближении "независимой" диффузии [1].

Таким образом, выражение (6) в первом приближении может быть использовано для определения суммарной скорости роста интерметаллидов на эв-

Таблица 4

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя x , мм			
	x_{Cu}	x_{Ag}	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (эксперимент)	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (расчет)
50	0,035	0,550	1,100	1,048
100	0,065	0,910	1,500	1,742
150	0,135	1,212	2,100	2,384
200	0,220	1,520	2,800	3,058
250	0,300	1,950	3,700	3,946

Таблица 5

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя x , мм			
	x_{Cu}	x_{Ag}	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (эксперимент)	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (расчет)
50	0,038	0,650	1,200	1,166
100	0,070	1,000	1,850	1,808
150	0,150	1,380	2,500	2,764
200	0,240	1,690	3,300	3,536
250	0,310	2,200	4,200	4,598

Таблица 6

Температура $T, ^\circ\text{C}$	Толщина слоя x , мм			
	x_{Cu}	x_{Ag}	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (эксперимент)	$x_{(\text{Cu—Ag})}$ (расчет)
50	0,050	0,700	1,400	1,776
100	0,076	1,152	2,050	2,096
150	0,165	1,480	2,680	2,756
200	0,275	1,850	3,550	3,538
250	0,360	2,450	4,652	4,680

тектике исходя из известных скоростей образования интерметаллидов на отдельных фазах, что дает возможность рассчитывать технологические и физико-химические параметры затвердевания галлие-вых паст-припоев сложного состава.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Франк-Каменецкий Д. Ф. Диффузия и теплопередача в химической кинетике. М.: Наука, 1967. 326 с.
2. Лашко Н. Ф., Лашко С. В. Контактные металлургические процессы при пайке. М.: Металлургия, 1977. 192 с.
3. Темных В. И., Казаков В. С., Митяев А. Е. Формирование композиционных структур припоев на основе галлия // Технология машиностроения. 2006. № 9. С. 46—50.
4. Темных В. И., Казаков В. С. Исследование влияния состава и структуры медносеребряных сплавов на фазообразование при взаимодействии с жидким галлием // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов / Под ред. К. В. Фролова. М.: Знание, 2004. С. 363—367.
5. Темных В. И., Казаков В. С. Композиционные диффузионно-твердеющие припои на основе галлия // Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов / Под ред. К. В. Фролова. М.: Знание, 2006. С. 203—208.

А. И. ЧЕРЕПАНОВ, канд. техн. наук, В. Г. БАБКИН, д-р техн. наук
Сибирский федеральный университет

Расчет литейной усадки алюминиевых сплавов и композиционных материалов

В настоящее время при изготовлении ряда изделий и узлов в машиностроении, авиационной и космической техники широко применяют литейные и деформируемые высокопрочные и легкие алюминиевые сплавы и алюмоматричные композиционные материалы (КМ). Процесс разработки сплавов и КМ включает формирование исходных проектных данных, охватывающих условия эксплуатации, необходимые физические, механические и другие характеристики изделий, а также учитывает требования технологичности при их изготовлении и обеспечения заданной структуры.

Литые изделия из алюминиевых сплавов изготавливают в основном в металлических формах (кокилях). Интенсивное охлаждение отливки в кокиле способствует увеличению скорости затвердевания отливки, что благоприятно влияет на ее структуру, так как при этом измельчаются зерно твердого раствора, эвтектика и вторичные фазы. Однако кокиль практически неподатлив и более интенсивно препятствует усадке отливки, что затрудняет извлечение ее из формы и может вызвать появление внутренних напряжений, коробление отливки и трещины в ней, особенно если отливка имеет внутреннюю полость, которая оформляется металлическим стержнем. Поэтому усадка при затвердевании сплава и охлаждении отливки влияет на ее качество. Величина усадки является важной характеристикой и при разработке литых КМ, предназначенных для работы в условиях большого градиента температур и различных давлений. Несомненно, при выборе материала упрочнителя и химического состава матричного сплава необходимо учитывать температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) исходных материалов и расчетными методами оценивать усадку КМ на стадии проектирования.

Линейную усадку сплава приближенно рассчитывают по известному уравнению [1]

$$\varepsilon = \alpha_{\text{ср}}(T_{\text{с}} - T_{\text{н}})100 \%, \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{ср}}$ — среднее значение ТКЛР; $T_{\text{с}}$, $T_{\text{н}}$ — соответственно температура солидуса и окружающей среды.

Однако при производстве реальных отливок в металлических формах с жестким чугунным или стальным стержнем следует рассчитывать затрудненную усадку, которая определяется термическими свойствами стержня и отливки. Такой подход был разработан и реализован в работах [2, 3].

Если пренебречь предусадочным расширением алюминиевого сплава, то изменение размеров ме-

таллического стержня — элемента кокиля и отливки при охлаждении можно рассчитать в соответствии с соотношениями

$$l_{298\text{ст}} = l_{\text{ст}}(1 - \alpha_{\text{ст}}\Delta T_{\text{ст}}); \quad (2)$$

$$l_{298\text{от}} = l_{\text{от}}(1 - \alpha_{\text{от}}\Delta T_{\text{от}}), \quad (3)$$

где $l_{\text{ст}}$, $l_{\text{от}}$ — размеры стержня и отливки при температуре кристаллизации; $l_{298\text{ст}}$, $l_{298\text{от}}$ — то же, при $T = 298 \text{ K}$; $\Delta T_{\text{ст}}$, $\Delta T_{\text{от}}$ — температурные интервалы охлаждения стержня и отливки до 298 K.

В момент извлечения стержня $l_{\text{от}} = l_{\text{ст}}$, тогда из уравнений (2) и (3) получим

$$l_{298\text{ст}} = l_{298\text{от}} \frac{1 - \alpha_{\text{ст}}\Delta T_{\text{ст}}}{1 - \alpha_{\text{от}}\Delta T_{\text{от}}} = l_{298\text{от}}K, \quad (4)$$

$$\text{где } K = \frac{1 - \alpha_{\text{ст}}\Delta T_{\text{ст}}}{1 - \alpha_{\text{от}}\Delta T_{\text{от}}}. \quad (5)$$

Литейная усадка

$$\varepsilon_{\text{л}} = (K - 1)100\%, \quad (6)$$

где K — коэффициент усадки, зависящий от состава сплава отливки и материала кокиля, а также температурного интервала охлаждения стержня и отливки до нормальной температуры.

Очевидно, что ΔT представляет среднее значение, так как температурное поле неоднородно. Поскольку $\alpha_{\text{от}}$ и $\alpha_{\text{ст}}$ — справочные или расчетные величины, то определение коэффициента затрудненной усадки сводится к определению ΔT . Эту задачу можно решить экспериментально или моделированием процесса кристаллизации на ЭВМ. Тем не менее даже приближенное определение ΔT позволяет более точно назначать исполнительные размеры при проектировании оснастки. Анализируя формулу (5), видно, что усадка будет изменяться в зависимости от температуры кристаллизации, материалов кокиля и отливки. Варьируя температуру кокиля и время его разборки, можно повысить точность изготовления отливок.

В табл. 1 приведены экспериментальные и расчетные значения литейной усадки. Детали — обе-

Таблица 1

Показатель	По технологии	Фактические	Отклонение	По расчету	Фактические	Отклонение
Литейная усадка, %	1,00	0,65	0,35	0,60	0,65	0,05
Внутренний размер отливки, мм	600	602,1	2,1	600	599,7	0,3
Размер стержня, мм	606	606		603,7	603,7	

чайки из сплава АК12. Температура заливки 973 К, температура начала кристаллизации около 853 К. Удаление стержня производили при температуре 623 К, материал стержня — сталь 20. При измерении отливок установили, что фактическая затрудненная усадка отливок меньше, чем установленная технологическим процессом. Расчетная усадка отливок имеет небольшое отклонение от номинального размера, устанавливаемого конструкторской документацией.

На рис. 1 приведен график изменения размеров отливки и стержня в процессе охлаждения. Видно, что после заливки кокиля сплавом (силумином) изменение размера отливки зависит от изменения размера стального стержня.

Точка разветвления кривых изменения размеров при охлаждении (около 673 К) соответствует моменту извлечения стержня из отливки. После извлечения стержня отливка изменяет линейные размеры в соответствии со скоростью охлаждения и ТКЛР сплава.

При исследовании температурных изменений размеров образцов из алюминиевых сплавов установили, что ТКЛР сплавов всегда выше, чем материала оснастки кокилей, а значит, всегда создаются условия для затрудненной усадки и развития горячих трещин в отливках. Для уменьшения влияния затрудненной усадки на образование трещин необходимо применять материалы оснастки (стержня), имеющие ТКЛР, близкие значениям ТКЛР материала отливки, а также создавать такие сплавы для оснастки и прогнозировать их ТКЛР.

В табл. 2 приведены экспериментальные, справочные и расчетные значения ТКЛР промышленных алюминиевых сплавов. ТКЛР рассчитывали по следующей формуле [4]:

$$\alpha = \frac{\alpha_1 C_1}{\rho_1 \left(\frac{C_1}{\rho_1} + \frac{C_2}{\rho_2} + \dots + \frac{C_i}{\rho_i} \right)} + \frac{\alpha_2 C_2}{\rho_2 \left(\frac{C_1}{\rho_1} + \frac{C_2}{\rho_2} + \dots + \frac{C_i}{\rho_i} \right)} + \dots + \frac{\alpha_i C_i}{\rho_i \left(\frac{C_1}{\rho_1} + \frac{C_2}{\rho_2} + \dots + \frac{C_i}{\rho_i} \right)}, \quad (7)$$

Таблица 2

Сплав	Источник данных	$\alpha 10^6, \text{K}^{-1}$, при температуре, К			
		373	473	573	673
АК9ч	Эксперимент	22,1	23,4	24,0	26,3
	Справочные	21,7	22,7	23,5	25,6
	Расчет	21,8	23,1	24,3	26,1
АМг6	Эксперимент (DIL 402 С)	24,5	25,8	26,9	27,6
	Справочные	24,7	25,5	26,5	27,9
	Расчет	24,3	25,7	27,2	28,7
Д16	Эксперимент	23,7	25,2	27,7	30,6
	Справочные	22,6	24,7	27,3	30,2
	Расчет	23,3	24,5	27,1	29,4

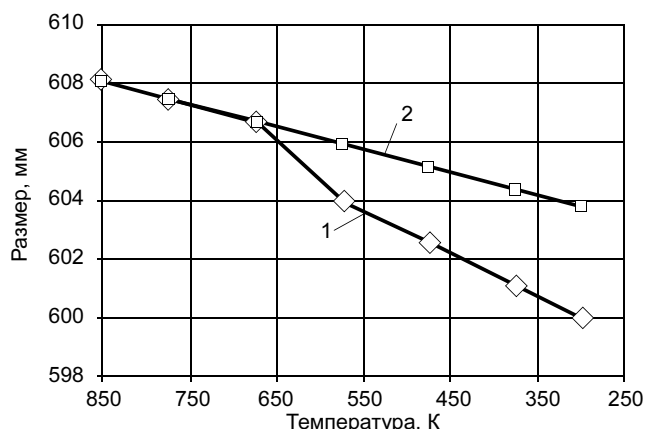


Рис. 1. Зависимость размеров отливки (1) и стержня (2) от температуры в процессе охлаждения в металлической форме

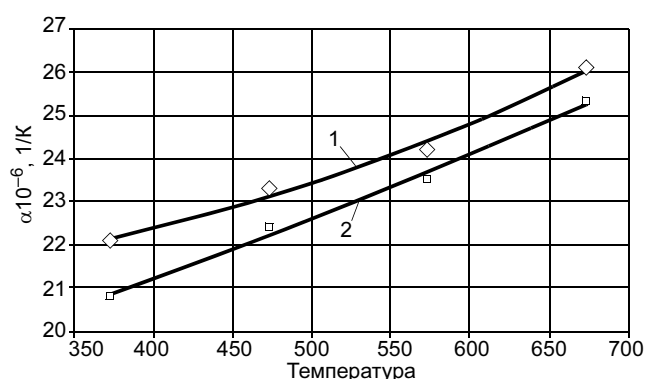


Рис. 2. Экспериментальные (1) и расчетные (2) значения ТКЛР

где $\alpha, \alpha_1, \dots, \alpha_i$ — ТКЛР сплава, 1-го, ..., i -го компонента; $C_1, \dots, C_i$ — содержание 1-го, ..., i -го компонента в сплаве; $\rho_1, \dots, \rho_i$ — плотность 1-го, ..., i -го компонента в сплаве.

Экспериментальные значения ТКЛР сплава АМг6 получены при измерении dilatометром DIL 402 С фирмы NETZSCH (Германия). Чувствительность dilatометра 1,25 нм. Видно, что значения ТКЛР, рассчитанные и полученные из различных источников, различаются между собой не более чем на 5 %. Поэтому расчетный метод получения ТКЛР можно применять для изучения и прогнозирования свойств сплавов при нагреве и охлаждении, а также для расчета ТКЛР сплавов и литейных композиционных материалов (ЛКМ), литейной усадки, внутренних напряжений и др.

Для проверки адекватности применения формулы (7) для расчета ТКЛР ЛКМ измеряли ТКЛР образцов с содержанием частиц 20 % Al_2O_3 . Результаты приведены на рис. 2. Экспериментальные и расчетные значения ТКЛР ЛКМ состава $\text{Al}—20\% \text{Al}_2\text{O}_3$ отличаются не более чем на 6 %. Расчетные значения ТКЛР меньше, чем измеренные.

ТКЛР исследованных ЛКМ в зависимости от состава и температуры приведены на рис. 3, 4.

Видно, что при увеличении содержания частиц в ЛКМ ТКЛР снижается, причем ЛКМ с частицами SiO_2 имеет более низкий ТКЛР по сравнению с ТКЛР ЛКМ с частицами Al_2O_3 . Это можно объяснить, проанализировав формулу (7). Чем больше содержание частиц Al_2O_3 или SiO_2 , тем больше происходит замещение доли алюминия с высоким ТКЛР и уменьшается его влияние. Вклад дисперсных частиц (имею-

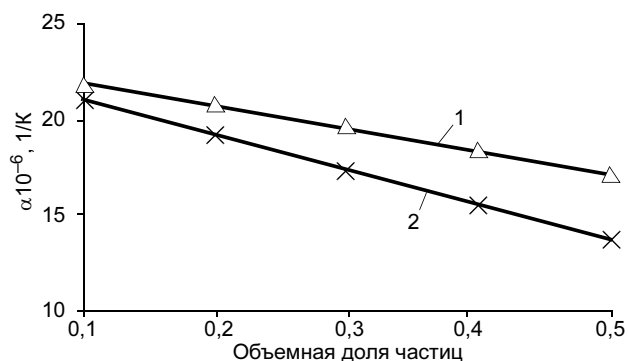


Рис. 3. Расчетные значения ТКЛР ЛКМ при $T = 298 \text{ К}$ в зависимости от объемной доли частиц: 1 — $\text{Al—Al}_2\text{O}_3$; 2 — Al—SiO_2

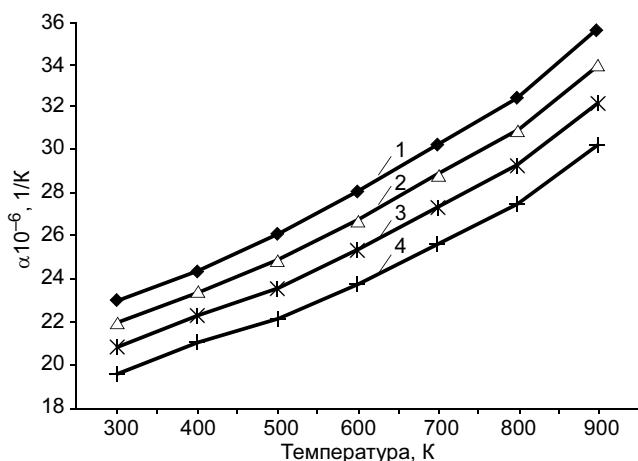


Рис. 4. Зависимость ТКЛР ЛКМ системы $\text{Al—Al}_2\text{O}_3$ от температуры: 1—4 — содержание частиц Al_2O_3 или SiO_2 соответственно 0, 10, 20 и 30%

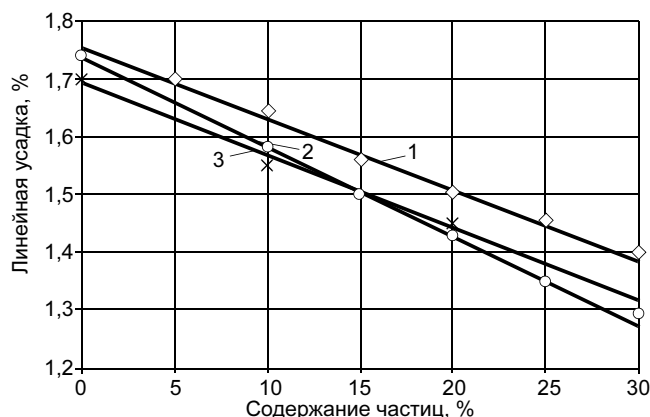


Рис. 5. Зависимость линейной усадки от содержания частиц $\text{Al—Al}_2\text{O}_3$ (1, 3) и Al—SiO_2 (2): 1, 2 — расчетные данные; 3 — экспериментальные

щих более низкий ТКЛР по сравнению с алюминием) увеличивается, что приводит к уменьшению ТКЛР ЛКМ. Другие составляющие формулы, в данном случае плотность, имеют меньшее значение, так как плотности компонентов сплава незначительно различаются между собой.

Обобщая экспериментальные и расчетные данные, можно получить ТКЛР расчетным методом и использовать его для расчетов на стадиях разработки новых материалов и сплавов.

Усадка литейных композиционных материалов (ЛКМ)

Данные о линейной усадке отливок из ЛКМ, которые необходимы для получения отливок с необходимой точностью, в научно-технической литературе представлены недостаточно. Поэтому экспериментально измерили линейную усадку ЛКМ [3] состава $\text{Al—Al}_2\text{O}_3$. Установили, что линейная усадка уменьшается с ростом содержания дисперсных частиц (рис. 5).

Экспериментальные и расчетные значения усадки для $\text{Al—Al}_2\text{O}_3$ различаются по абсолютной величине до 0,1 %, т. е. практически совпадают. Поэтому далее рассчитали линейную усадку ЛКМ для Al—SiO_2 .

Линейная усадка имеет тот же характер изменения, т. е. чем больше содержание частиц, тем меньше ТКЛР ЛКМ и меньше его линейная усадка. Более низкие значения линейной усадки ЛКМ системы Al—SiO_2 по сравнению с системой $\text{Al—Al}_2\text{O}_3$ обусловлены соотношением $\text{ТКЛР}_{\text{SiO}_2} < \text{ТКЛР}_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ в соответствии с формулой (5). Экспериментальные значения линейной усадки для чистого алюминия, $\text{Al—10 \% Al}_2\text{O}_3$ и $\text{Al—20 \% Al}_2\text{O}_3$ ниже расчетных. Возможно, это вызвано затрудненной усадкой образцов из-за трения о стенки металлической формы в процессе охлаждения. Разность значений находится в пределах от 2,9 % для алюминия до 4,5 % для $\text{Al—20 \% Al}_2\text{O}_3$.

ВЫВОД

Предлагаемая методика позволяет рассчитывать линейную усадку отливок при литье в металлические формы (кокиля) для повышения точности изготовления формообразующей оснастки до проведения экспериментальных измерений на стадиях проектирования состава и технологии новых материалов и сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Трухов А. П., Маляров А. И. Литейные сплавы и плавка. М.: Академия, 2004. 336 с.
2. Черепанов А. И., Оборин Л. А., Леонов В. В. Определение величины линейной усадки при литье в кокиль на этапе проектирования технологии // Прогрессивная технология производства отливок из цветных металлов. Киев, 1990.
3. Черепанов А. И. Термические свойства литейных композиционных материалов: Дис. ... канд. техн. наук. Красноярск: КГАЦМиЗ, 2004.

А. М. ТОКМИН, канд. техн. наук, С. Г. ТЕРЕМОВ, инж., О. А. МАСАНСКИЙ, аспирант
Сибирский федеральный университет

Исследование структуры и свойств слоя, полученного индукционной наплавкой металлических порошков

Применение индукционной технологии для получения наплавленных слоев обусловлено стремлением повысить скорости нагрева и охлаждения с целью создания максимально неравновесных структур, которые при определенных условиях могут обеспечить высокий комплекс эксплуатационных свойств. Кроме того, высокие скорости нагрева и охлаждения способствуют уменьшению нагреваемого объема подложки и, как следствие, снижению деформации и других отрицательных последствий наплавки.

Известно, что свойства биметалла, полученного наплавкой, во многом определяются размерами и строением переходной зоны (ПЗ) [1]. Ширина этой зоны, определяемая способами и режимами наплавки, оказывает определяющее влияние на эксплуатационные свойства изделия — чем уже ПЗ, тем слабее ее влияние на свойства.

Ширина ПЗ и ее строение во многом определяют качество наплавки, т. е. прочность сцепления наплавленного слоя с материалом подложки. При любых способах наплавки, когда происходит расплавление подложки, неизбежно формируется ПЗ, имеющая значительную ширину, кроме того, она имеет волнообразный вид с переменным химическим составом, поскольку наплавляемый металл перемещается с металлом подложки.

Существенный интерес представляют технологии наплавки, не приводящие к оплавлению подложки, а сцепление наплавленного слоя с металлом подложки реализуется за счет процессов растворения и диффузии в зоне их контакта. Такой способ наплавки может быть обеспечен при нагреве наплавляемого материала токами высокой частоты (ТВЧ).

Применение генератора УВГ-2-25 с выносным нагрузочным контуром позволяет реализовать наплавку порошковыми материалами, отличающуюся комплексом необходимых физико-механических свойств в условиях износа [2]. Прежде всего, это связано с возможностью контроля ввода поступающей энергии путем изменения рабочей частоты генератора в широком диапазоне и, следовательно, управления тепловыми и фазовыми процессами в период плавления, кристаллизации и последующего охлаждения. Правильный выбор режима наплавки позволяет получить качественную ПЗ небольшой толщины. Индукционную наплавку порошкового "Сормайт" осуществляли на сталь 09Г2С. Индуктор торцевого типа с ферритовым усилителем располагали над деталью, на поверхность которой пред-

варительно наносили слой наплавляемого материала в виде порошка в смеси с флюсом ФНП-21 в соответствующей пропорции.

При исследовании процессов, происходящих при нагреве и плавлении порошковой шихты, необходимо учитывать факторы, определяющие условия нагрева. Прежде всего следует оценить влияние частоты тока на кинетику разогрева и плавления отдельных частиц. Известно [3], что с увеличением частоты тока растут энергетические показатели нагрева, но уменьшается толщина скин-слоя, определяемая выражением:

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \mu_0 \sigma}},$$

где ω — циклическая частота генератора; μ — магнитная проницаемость вещества; μ_0 — магнитная постоянная; σ — удельная проводимость вещества.

Оценка толщины скин-слоя (материал "Сормайт", частота 100 кГц, для парамагнетиков $\mu = 1$, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Ф/м, $\sigma = 10^7$ См/м) дает величину около 500 мкм, что сравнимо со средним размером частиц порошка, используемого для наплавки. Следовательно, в этом случае частицы среднего размера около 200 мкм прогреваются равномерно. В свою очередь, ферромагнитная подложка, на которую производится наплавка, прогревается намного интенсивнее, причем толщина скин-слоя подложки составляет около 16 мкм вплоть до перехода материала подложки в парамагнитное состояние. Такое поведение подложки может являться одним из способов регулирования процесса наплавки.

Сначала происходит быстрый разогрев подложки, так как поглощаемая мощность пропорциональна величине $\sqrt{\rho \mu}$ (ρ — удельное сопротивление материала подложки, μ — его магнитная проницаемость) [4]. Глубина проникновения тока δ_n на частоте 10^5 Гц при температуре подложки 18—20 °С составляет около 0,06 мм. По мере разогрева подложки эта величина растет как за счет увеличения удельного сопротивления, так и за счет уменьшения магнитной проницаемости материала подложки. При 1300 °С глубина проникновения составляет около 1,8 мм [5].

При этом слой порошка "Сормайт" нагревается незначительно, так как частицы порошка электрически изолированы друг от друга оксидным слоем и слоем флюса. Вследствие этого каждая частица нагревается независимо от других, глубина проникновения волны δ_c в "Сормайт" при 18—20 °С составляет около 0,16 мм, что совпадает со средним размером частиц порошка.

Если магнитоанизотропный материал поместить в магнитное поле, то химический потенциал атомов в зерне будет зависеть, кроме обычных скалярных параметров, от ориентации зерна в магнитном поле, также следует учитывать энергетическое состояние поверхности частицы. Частицы наплавляемого сплава имеют небольшие размеры (не более 200 мкм), т. е. большое количество атомов находится на ее поверхности и имеет химический потенциал, отличный от потенциала атомов, находящихся на некотором удалении от поверхности. За счет повышенного термодинамического потенциала поверхности частицы начало ее оплавления возможно при температурах, несколько меньших, чем требуется для расплавления всего объема частицы [6]. Такой процесс может протекать в условиях равновесной термодинамики, так как плавление носит диффузионный характер и для его осуществления необходимо определенное время.

В случае индукционного нагрева, при котором происходит высокоэнергетическое воздействие на материал, далекое от условий равновесной термодинамики, скорость роста температуры составляет более 1000 °C/с и определяющую роль в кинетике нагрева частицы будут играть неравновесные процессы. Толщина скин-слоя частицы, которая для конкретного материала во многом определяется частотой тока в индукторе и параметрами материала [4], может существенно изменяться в зависимости от режимов нагрева. В случае применения парамагнитных порошков, у которых магнитная проницаемость $\mu = 1$, возможно управление толщиной скин-слоя за счет изменения частоты тока. Это позволяет управлять кинетикой наплавки частиц в широком диапазоне: с частичным оплавлением; полным расплавлением; полным расплавлением и изотермической выдержкой в течение определенного времени.

Поверхности частиц и подложки покрыты слоем оксидов. При правильном хранении порошка их толщина незначительна, а поверхность подложки может быть подготовлена путем механической обработки, но это не исключает наличия оксидной пленки на поверхности. Для получения качественной наплавки необходимо обеспечить хорошее смачивание подложки образующейся жидкой фазой, а также понизить силы поверхностного натяжения жидкости, образующейся на поверхности частиц. Это возможно лишь при наличии среды, обладающей защитными и рафинирующими свойствами. В данном случае для создания такой среды использовался флюс ФНП-21. При плавлении флюса за счет его высокой активности происходит взаимодействие с оксидами и рафинирование поверхности подложки и наплавляемых частиц.

Механические свойства определяли по стандартным методикам. Микроструктуру образцов после наплавки исследовали с помощью светового микро-

скопа Carl Zeiss Axio Vision, оснащенного устройством визуализации изображения, и растрового электронного микроскопа HITACHI TM-1000 и РЭМ-100У.

В случае реализации наплавки с частичным оплавлением морфология твердофазного скелета и распределение жидкой фазы существенно влияют на получающуюся микроструктуру, а значит, и свойства материала. В данном случае возможно сохранение дисперсной структуры, свойственной частицам порошка. Мелкие карбиды, равномерно распределенные в металлической матрице, обеспечивают максимальные значения твердости, прочности и износостойкости. Режимы наплавки в этом случае жесткие. Прежде всего, ограничено время нахождения шихты под действием переменного электромагнитного поля. Увеличение времени нагрева может привести к полному расплавлению частиц, что в данном случае недопустимо, поэтому толщина наплавляемого слоя ограничена. Анализ твердости наплавленных образцов показал, что с увеличением скорости наплавки твердость возрастает. Твердость слоя толщиной до 1 мм при наплавке со скоростью 8 м/ч достигает 57 HRC (см. таблицу), причем формирующаяся при этом зона сплавления не имеет значительных дефектов (рис. 1).

Взаимодействие жидкой фазы с подложкой происходит за счет растворения подложки, которая имеет ферритно-перлитное строение. Температура плавления подложки значительно выше, чем наплавляемого сплава, кроме того, режимы подбираются таким

Толщина слоя, мм	Твердость, HRC, при скорости наплавки, м/ч							
	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5
1,0	44	44	45	49	52	55	57	—
2,0	43	45	46	50	54	—	—	—
3,0	42	44	48	51	—	—	—	—
4,0	42	43	47	—	—	—	—	—

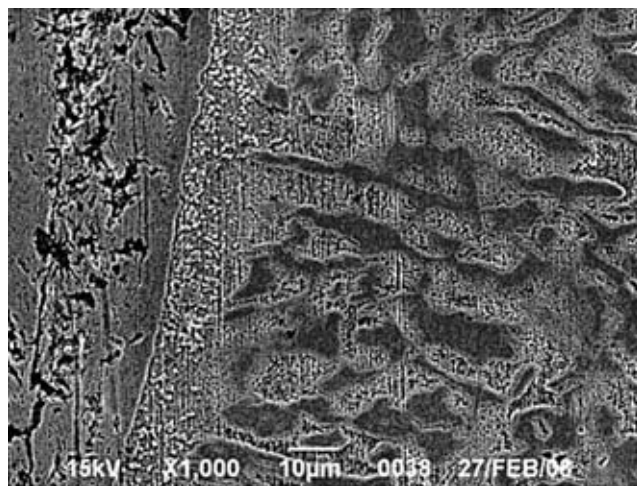


Рис. 1. Зона сплавления (слева — подложка)

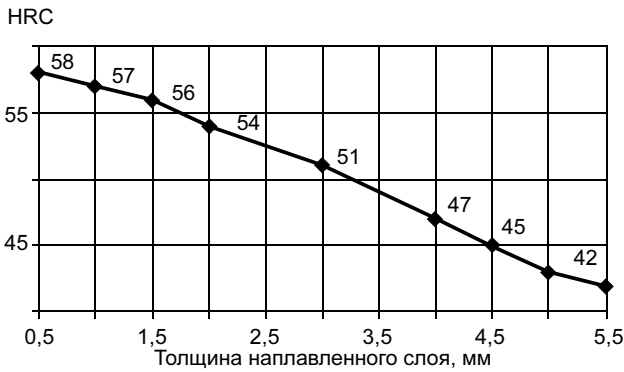


Рис. 2. Зависимость твердости наплавленного слоя от его толщины

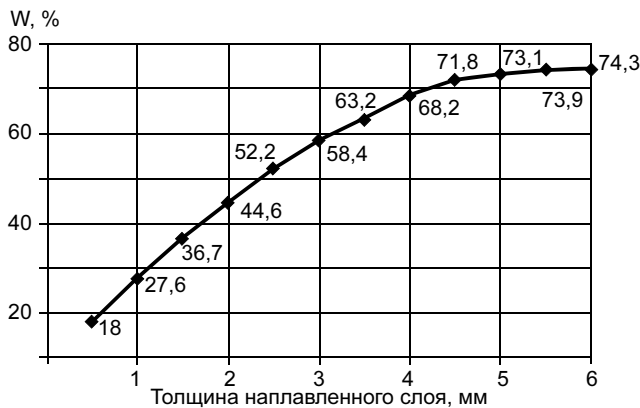
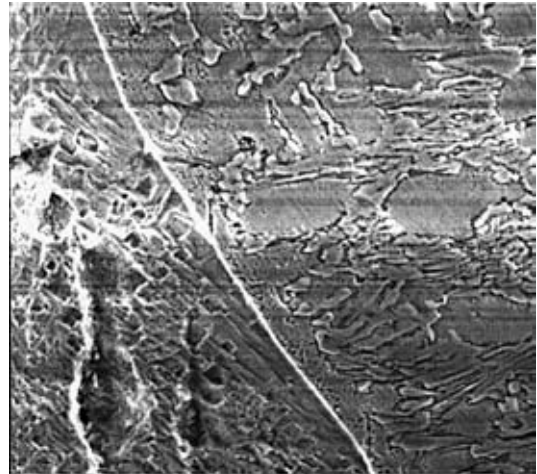


Рис. 3. Зависимость износостойкости наплавленного слоя от его толщины

образом, чтобы не допустить длительной выдержки расплавленного порошка с поверхностью подложки. Это исключает плавление поверхности подложки (см. рис. 1).

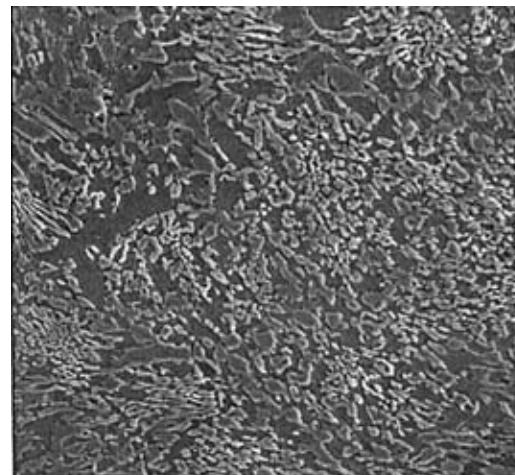
При увеличении времени воздействия переменного электромагнитного поля на шихту происходит полное расплавление частиц. В этом случае возможна наплавка слоя толщиной 2—3 мм. Происходит некоторое увеличение размеров карбидов по сравнению с предыдущим случаем и, как следствие, снижение твердости (рис. 2) и износостойкости (рис. 3). Переходная зона остается очень узкой, практически вырожденной в линию (рис. 4).

Для получения слоя толщиной более 3 мм необходимо значительно увеличить время воздействия электромагнитного поля на шихту, а это снижает скорость наплавки. В этом случае часть расплавленного сплава находится какое-то время в контакте с подложкой, что вызывает ее разогрев. После прохождения индуктором зоны наплавки скорость охлаждения снижается, что приводит к формированию крупных карбидов (рис. 5). Такая структура имеет пониженную твердость (см. таблицу) и износостойкость (см. рис. 3). Переходная зона подложки с наплавленным сплавом имеет строение, аналогичное рассмотренным ранее.



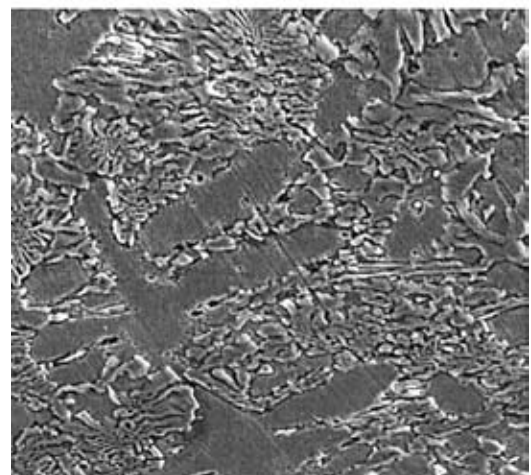
КГТУ * РЭМ-100У * 30 kv X 500 — 40 мк*

Рис. 4. Переходная зона и микроструктура наплавленного металла в правом углу



КГТУ * РЭМ-100У * 30 kv X 500 — 40 мк*

а)



КГТУ * РЭМ-100У * 30 kv X 500 — 40 мк*

б)

Рис. 5. Микроструктура наплавленного слоя: а — скорость наплавки 8 м/ч; б — 5 м/ч

Химический состав полученного слоя наплавленного металла соответствует составу наплавляемого порошка даже при толщине наплавленного слоя менее 1 мм. При этом необходимо учитывать, что увеличение скорости наплавки выше определенного значения приводит к образованию грубых дефектов в зоне сплавления (пор, газовых пузырей, раковин и т. д.), а ее снижение — к существенному огрублению микроструктуры наплавленного слоя, что вызывает значительное снижение твердости и отрицательно сказывается на износостойкости изделия.

При увеличении скорости наплавки от 5 до 8 м/ч твердость увеличивается в среднем на 5—10 HRC, дальнейшее ее увеличение сопровождается значительным ухудшением качества зоны сплавления, что отрицательно сказывается на эксплуатационных характеристиках. Скорость наплавки во многом определяется толщиной наплавляемого слоя. Так, при наплавке слоя толщиной 1 мм скорость составляет около 8 м/ч, а слоя толщиной 5—6 мм — 5 м/ч. Таким образом, формирование наплавленного слоя толщиной более 2 мм с высокой твердостью при данной технологии становится невозможным. Установлено, что износостойкость напрямую зависит от твердости и толщины наплавленного слоя (см. рис. 3). В ряде случаев необходимо иметь наплавленный слой толщиной 5 мм и более. Для получения высокой твердости такого слоя необходимо проводить многократную наплавку, при которой за один проход формируется слой толщиной 2—2,5 мм.

Проведенные исследования показали, что помимо скорости наплавки на качество зоны сплавления и наличие дефектов в наплавленном слое существенно влияет качество поверхности основного металла перед индукционной наплавкой. Наличие на поверхности загрязнений, оксидов различного происхождения приводит к возникновению зон непроплавления, большого количества пор, пузырей и т. д. Образование данных дефектов обусловлено недоста-

точным рафинированием поверхности в процессе наплавки. В связи с этим перед наплавкой необходимо проведение соответствующих мероприятий, исключающих образование дефектов.

На основании выполненных исследований и разработанной технологии были наплавлены ножи грейдеров (рис. 6). Толщина наплавленного слоя составляла 5—6 мм, ширина 65 мм и длина 1,5 м. Скорость наплавки составляла 5 м/ч. Производственные испытания показали повышение стойкости экспериментальных ножей в 2 раза по сравнению с ножами, наплавленными дуговой сваркой электродами Т-640. Кроме того, был полностью исключен брак, который возникал при электродуговой наплавке за счет значительной деформации и растрескивания.

ВЫВОДЫ

1. Определяющим фактором получения высокой твердости и износостойкости слоя, полученного индукционной наплавкой порошкового "Сормайта", является скорость процесса, наибольшая твердость формируется при скорости наплавки 7—8 м/ч.
2. Повышенная скорость наплавки позволяет получать слой, толщина которого не превышает 2—3 мм.
3. Для получения максимально высокой твердости и износостойкости наплавленного слоя толщиной более 3 мм необходимо выполнять многократную наплавку с повышенной скоростью.
4. Применение соответствующей технологии индукционной наплавки порошкового "Сормайта" позволяет получать переходную зону минимальной ширины без оплавления металла подложки.
5. Наплавку рекомендуется проводить на предварительно подготовленную поверхность для уменьшения вероятности образования дефектов.
6. Производственные испытания ножей грейдеров с индукционной наплавкой порошковым "Сормайтом" показали двукратное увеличение износостойкости по сравнению с ножами, наплавленными дуговой сваркой электродами Т-640.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соколов Г. Н. Структура и свойства переходной зоны между наплавленным инструментальным металлом и конструкционной сталью // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 12. С. 46—50.
2. Особенности индукционной наплавки износостойких материалов на генераторе ТВЧ нового поколения / А. М. Токмин, Л. А. Быконя, О. А. Масанский, Е. Ю. Васильева // Слоистые композиционные материалы — 2001. Волгоград, 2001. С. 259—261.
3. Слухоцкий А. Е., Рыскин С. Е. Индукторы для индукционного нагрева. Л.: Энергия, 1974. 264 с.
4. Индукционная наплавка твердых сплавов / В. Н. Ткачев, Б. М. Фиштейн, Н. В. Казинцев, Д. А. Алдырев. М.: Машиностроение, 1970. 183 с.
5. Топтыгин И. Н. Современная электродинамика. Ч. 2. Теория электромагнитных явлений в веществе. Москва-Ижевск: НИЦ Регулярная и хаотическая динамика, 2005. 848 с.
6. Страумал Б. Б. Фазовые переходы на границах зерен. М.: Наука, 2003. 327 с.



Рис. 6. Ножи грейдера с двухсторонней индукционной наплавкой

Н. МАШРАБОВ, канд. техн. наук
Челябинский государственный аграрный университет

Моделирование тепловых полей при механической обработке металлов численным методом

Большинство деталей автотракторной и сельскохозяйственной техники составляют детали тел вращения (64 %) с диаметром до 170 мм [1]. Поверхности деталей подвергаются восстановлению, механической и термической обработке. Одним из способов повышения эффективности технологических процессов при изготовлении и восстановлении деталей из труднообрабатываемых материалов, главным образом при резании лезвийными инструментами, является подогрев зоны обработки с помощью электрической или тепловой энергии [2]. Определение температуры на поверхности и в глубине от действия наружного источника теплоты является ответственным этапом при разработке и установлении технологических параметров процессов и должно способствовать повышению долговечности деталей при их изготовлении и восстановлении. Недостаток или отсутствие данных о температурных полях приводит к неоправданным расходам времени и средств.

Цель данной работы — совершенствование метода расчета температурных полей в цилиндре при действии поверхностных тепловых источников. Учет зависимости коэффициентов теплофизических свойств металла и теплоотдачи от температуры приводит к линейным дифференциальным уравнениям процесса и нелинейным граничным условиям и ведет к невозможности получения расчетных уравнений процесса аналитическими методами [3]. Учитывая изложенное и рекомендации по решению подобных задач [3, 4], поставленную физическую задачу решали численным методом.

Исходными данными при решении задачи являются теплофизические свойства материала детали, геометрические размеры детали, теплоотдача на границе в зависимости от температуры, угловая скорость детали, скорость движения источника теплоты относительно оси детали, мощность источника теплоты и др. Приняты следующие обозначения: c — теплоемкость на единицу объема; q — коэффициент теплопроводности; R — радиус цилиндра; T — температура окружающей среды; l — теплоотдача на границе; $U(t, r, \varphi, z)$ — температура. Проведено обезразмеривание переменных следующим образом: радиальная координата r отнесена к радиусу цилиндра R , осевая координата z отнесена к радиусу цилиндра R ,

угловая координата φ безразмерна, длина цилиндра L отнесена к радиусу R , время t отнесено к величине $s = (cR)^2/q$, угловая скорость ω отнесена к l/s , скорость подачи v — к R/s , мощность теплоисточника Q — $(qab)/R$, теплоотдача на границе l — к q/R , длина a источника теплоты по окружности — к радиусу цилиндра R , длина b источника по оси цилиндра — к радиусу цилиндра R ; t, r, φ, z — безразмерные переменные; l, L, a, b — безразмерные параметры.

Граничные условия на рубашке цилиндра

$$U_r = \begin{cases} Q \text{ при } r = 1, 0 < \varphi < a, Z_0 + vt < Z < Z_0 + b + vt; \\ l(T - U) \text{ при } r = 1 \text{ на охлаждающей поверхности.} \end{cases}$$

На торцах цилиндра происходит охлаждение:

$$U_z = -l(T - U) \text{ при } z = 0;$$

$$U_z = l(T - U) \text{ при } z = L.$$

В начальный момент времени температура известна.

Расчетная схема данной задачи приведена на рис. 1.

Если на границе круга имеется движущийся тепловой источник, то удобно рассматривать вращающуюся систему координат с постоянной угловой скоростью ω . Тогда уравнение теплопроводности

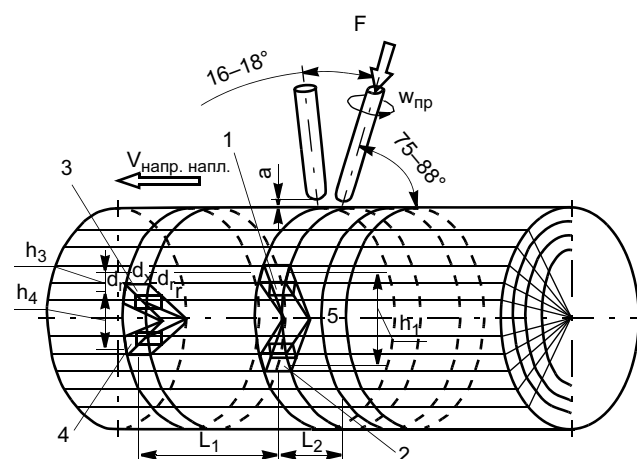


Рис. 1. Расчетная схема задачи (a — зазор между неплавящимся электродом и деталью; F — усилие прижатия присадочной проволоки); 1—4 — источники теплоты; 5 — охладитель

примет вид (коэффициенты и переменные безразмерны)

$$\frac{\partial u}{\partial t} - \omega \frac{\partial u}{\partial \varphi} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \varphi^2}. \quad (1)$$

В этом случае для устойчивости явной численной схемы уравнения (1) приходим к линейному уравнению в частных производных первого порядка:

$$\frac{\partial}{\partial t} \bar{u}_{ik} - \omega \frac{\partial}{\partial \varphi} \bar{u}_{ik} + \mu \bar{u}_{ik} = f_{ik}, \quad (2)$$

где

$$f_{ik} = \left(\frac{2r_i + h}{2r_i} u_{i+1,k} + \frac{2r_i - h}{2r_i} u_{i-1,k} \right) \frac{1}{h^2} + \frac{u_{i,k-1} + u_{i,k+1}}{(r_i \alpha)^2}; \quad \mu = \frac{2}{h^2} + \frac{2}{(r_i \alpha)^2}.$$

Предположим, что для каждого значения r правая часть f_{ik} является функцией аргумента φ . Индекс i — номер узла сетки по радиусу, индекс k — номер узла сетки по углу. В выражении (2) черта над функцией u означает ее значение на следующем временном слое, отсутствие черты — вычисленное значение той же функции на предыдущем временном слое.

Решение уравнения (2) (явная схема) имеет вид [5]

$$\bar{u}_{ik} = u(\varphi + \omega \tau) e^{-\mu \tau} + \int_0^{\tau} e^{-\mu(\varphi + \omega s)} f(\varphi + \omega s) d\varphi, \quad (3)$$

где $u(\varphi + \omega \tau)$ — узлы (i, k) сетки, при которых $u_{ik} = u(\varphi + \omega \tau)$, т. е. значение $\varphi + \omega \tau$ попадает в узел (i, k) ; аналогичный смысл имеет выражение $f(\varphi + \omega s)$.

Таким образом, выражение (3) задает явную устойчивую схему для уравнения теплопроводности во вращающейся с угловой скоростью ω полярной системе координат. Интеграл в правой части (3) предполагает численное интегрирование в заданных узлах сетки функции.

Блок-схема расчета приведена на рис. 2. На основе блок-схемы разработана компьютерная программа расчета температурных полей в цилиндре при действии поверхностных тепловых источников "Тепло 5.0".

В основу компьютерной программы положена математическая модель, согласно которой разностные отношения во времени и влияние скорости вращения заменены решением линейного уравнения с частными производными первого порядка, а шаг по размеру и углу сохранены как разностные отношения. Этим обеспечивается устойчивость метода, в то время как известные явные схемы неустойчивы [6].

Математическая модель расчета (компьютерная программа) позволяет осуществлять расчет изменения температуры нагрева и охлаждения:

— при локальном нагреве в зависимости от времени (деталь вращается, источник теплоты неподвижен);



Рис. 2. Блок-схема "Расчет температурных полей в цилиндре при действии поверхностных тепловых источников" (условие K — выполнено хотя бы одно из условий: нажата клавиша Esc; источник теплоты достиг конца заготовки; температура превысила допустимую; выполнено заданное заранее число итераций)

— при заданной скорости перемещения источника теплоты вдоль оси детали;

— когда по радиусу детали расположено несколько источников теплоты разной мощности;

— когда вдоль оси детали расположено несколько источников теплоты разной мощности (что позволяет увеличить ширину нагрева),

а также просмотр изменения температуры нагрева и охлаждения заданного сечения в реальном времени.

Экспериментальное определение температурных полей проводили термометрированием с использованием хромель-алюмелевой термопары, ртутного токосъемника "Трак-4М". Регистрацию измеряемых величин осуществляли с помощью многофункционального измерительного комплекса MIC 400D.

Применение математической модели расчета (компьютерной программы) по определению температурных полей в цилиндре при действии поверхностных тепловых источников в условиях реального производства позволяет:

— сократить затраты времени инженеров-технологов на этапе технологической подготовки производства, связанные с определением режимов обработки, позволяющих повысить эффективность обработки посредством изменения условий и параметров процесса;

— сократить затраты времени инженеров-проектировщиков на этапе технологической и организационной подготовки производства, связанные с анализом полученных результатов расчета, позволяющих определить конструкцию установки;

— уменьшить себестоимость выпускаемой продукции за счет сокращения времени подготовительных операций и расхода электрической энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Техническое обслуживание и ремонт машин в сельском хозяйстве* / Под ред. В. И. Черноиванова и др. М.: Челябинск, 2001. 831 с.
2. *Резников А. Н.* Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машиностроение, 1981. 279 с.
3. *Рыкалин Н. Н.* Расчеты тепловых процессов при сварке. М.: Машгиз, 1951. 296 с.

4. *Вержбицкий В. М.* Основы численных методов. М.: Высшая школа, 2002. 847 с.
5. *Геренштейн А. В., Машрабов Н., Геренштейн Е. А.* Устойчивые явные схемы для уравнения теплопроводности // Вестник ЮУрГУ. Сер. "Математическое моделирование и программирование". 2008. Вып. 1. № 15 (115). С. 9—11.
6. *Самарский А. А.* Теория разностных схем. М.: Наука, 1989. 616 с.

М. А. ФЕДОРЕНКО, канд. техн. наук
Белгородский ГТУ им. В. Г. Шухова

Способ обработки цилиндрических поверхностей при базировании на эллиптических базах

Переход к рыночным отношениям — важнейший этап в совершенствовании производственных отношений и формировании нового подхода к решению производственных задач. Непредвиденный рост цен на новое промышленное оборудование поставил перед необходимостью заняться улучшением условий эксплуатации и ремонтом оборудования, находящегося на предприятиях. Особенно остро встал этот вопрос в тех отраслях, которые эксплуатируют металлоемкое и энергоемкое оборудование.

Одним из примеров является производство цемента, где для обжига сырья (производства клинкера) применяют вращающиеся печи с несущими бандажами диаметром до 8 м при длине печи до 230 м, общей массой до 2500 т при производительности до 100 т/ч, потребляющие большое количество электроэнергии.

Полученный клинкер поступает в помольные мельницы, количество которых в зависимости от их производительности может быть различным на одну печь.

Одним из основных узлов мельничного агрегата является шаровая трубная установка — помольная мельница (рис. 1).

К корпусу 4 крепится с одной стороны загрузочная крышка 1, с другой — разгрузочная крышка 5. Крышки цапфами опираются на опоры 3 и являются несущими узлами, воспринимающими все нагрузки, возникающие в процессе вращения мельницы и перемещения в ней материала и меющих шаров.

Размеры цапф зависят от размеров корпуса мельницы и ее общей массы. На рис. 2 приведен общий вид цапф, а в таблице — их основные размеры.

Частота вращения мельниц достигает до 21 мин^{-1} , и при наличии значительной неуравновешенности масс возникают большие динамические нагрузки, которые приводят к разрушению поверхности скольжения цапф и вкладышей подшипников скольжения.

Восстановление работоспособности этого узла возможно только двумя способами: демонтажом цапфы и восстановлением ее на промышленном предприятии, которое имеет специальное оборудование или при использовании специальных приставных

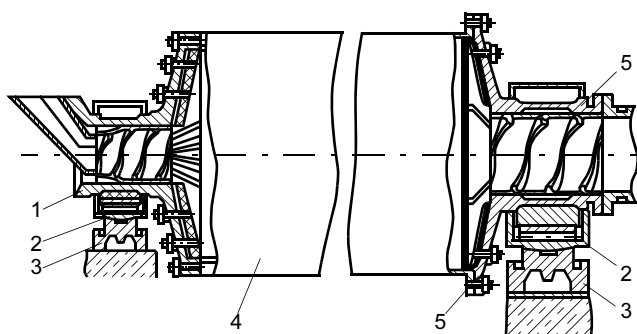


Рис. 1. Помольная мельница (2 — корпус подшипника)

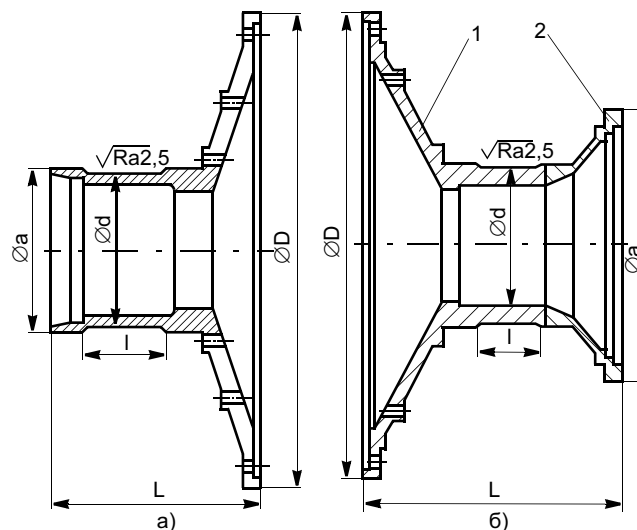


Рис. 2. Цапфа загрузочная (а) и разгрузочная (б): 1 — крышка; 2 — фланец

Типоразмер мельницы	D , мм	D_n , мм	Предельное отклонение	l , мм
$2 \times 10,5$	840	800	$-0,11$ $-0,37$	400
	840	800	$-0,11$ $-0,37$	370
$2,2 \times 13$	940	900	$-0,13$ $-0,40$	480
	940	900	$-0,13$ $-0,40$	450
$2,6 \times 13$	1230	1200	0 $-0,28$	800
	1230	1200	0 $-0,39$	760
3×14	1430	1400	$-0,19$ $-0,49$	840
	1550	1400	$-0,19$ $-0,49$	800
$3,2 \times 15$	1550	1400	$-0,19$ $-0,49$	920
	1550	1400	$-0,19$ $-0,49$	920
$4 \times 13,5$	1900	1800	$-0,21$ $-0,56$	1050
	1900	1800	$-0,21$ $-0,56$	1000

станков, разработанных в БГТУ им. В. Г. Шухова, на месте эксплуатации^{1, 2}.

Оба эти способа имеют недостаток, заключающийся в том, что в период ремонта мельница простаивает и не выпускает продукцию. В первом случае мельница простаивает длительное время в связи с тем, что восстановление работоспособности необходимо производить на каком-либо предприятии, а для этого следует демонтировать крышку с цапфой, доставить на ремонтный завод и после восстановления установить на корпус мельницы.

Второй способ позволяет восстанавливать рабочую поверхность в условиях эксплуатации, не демонтируя цапфу с крышкой, но при этом неизбежен простой мельниц на время проведения ремонтных работ, но этот простой значительно меньше по времени и требует меньших материальных затрат, чем восстановление на промышленном предприятии.

По результатам исследований цапф на ряде предприятий были установлены основные причины потери их работоспособности: задиры, трещины, риски, царапины, неравномерный износ поверхности скольжения, выбоины, налипание баббита. В основном глубина дефектных мест достигает до 2 мм, в отдель-

ных случаях — до 5 мм. Простой мельниц в зависимости от оснащённости ремонтной базы достигает до 300 ч, в основном устанавливают новые крышки с цапфами.

В связи с тем что необходимо обрабатывать поверхность скольжения цапфы, возникает вопрос о возможности обеспечения точности обработки при базировании ее на вспомогательных базах. В качестве вспомогательных баз конструкция мельницы позволяет использовать только бурты цапфы, которыми мельница удерживается от осевого перемещения.

Следовательно, конструкция станка должна обеспечивать использование буртов в качестве вспомогательных баз и точность обработки.

Единственным вариантом обработки цапф в условиях эксплуатации является базирование ее буртами на четырех роликах, т. е. на два бурта с использованием особенностей конструкции опоры цапфы (рис. 3).

На основании проведенных на ряде предприятий замеров диаметров буртов было установлено, что разница этих величин достигает до 3 мм.

Способ обработки крупногабаритных цилиндрических поверхностей, расположенных между двумя эллиптическими буртами, базирующимися на четырех роликах, отличается от традиционных способов обработки поверхностей на стационарных станках. Основным отличием рассматриваемого способа является то, что базирование крупногабаритной цилиндрической поверхности (цапфы мельницы) в процессе обработки осуществляется двумя буртами 1, 2, имеющими отклонения от круглости в пределах допусков, и в первом приближении их можно представить слабо выраженными эллипсами (1, 2) на четырех опорных роликах 3, 4 (см. рис. 3). Важным обстоятельством является то, что оси эллиптических буртов, поверхностью которых базируется цапфа на четырех роликах, смещены друг относительно друга. В процессе вращения цапфы ее ось OO' , прохо-

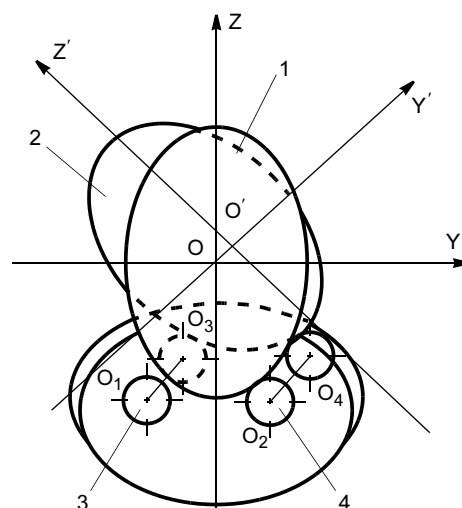


Рис. 3. Базирование детали в процессе обработки

¹ Федоренко М. А., Бондаренко Ю. А., Погонин А. А. Анализ затрат времени на восстановление работоспособности цапф // Энергосберегающие технологические комплексы и оборудование для производства строительных материалов. Белгород: БГТУ им. В. Г. Шухова, 2003. С. 263—265.

² Патент 31347 (РФ).

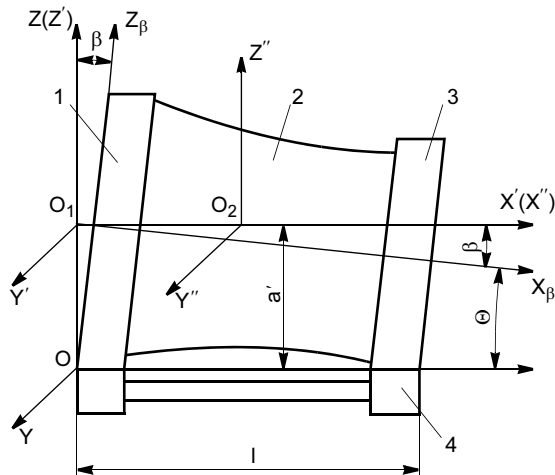


Рис. 4. Схема расположения цапфы относительно рассматриваемых систем координат: 1, 3 — эллиптические бурты цапфы; 4 — опорные ролики

двигаясь через центры эллипсов 1 и 2, перемещается в пространстве, вследствие чего перемещается прямоугольная система координат с началом в центре эллипса — точке O. Кроме того, в результате износа цапфа приобретает форму катеноида, которому механической обработкой необходимо придать форму правильного цилиндра.

Схема расположения цапфы на опорных роликах приведена на рис. 4. В реальной ситуации ось OZ, связанная с диаметром цапфы, перпендикулярным плоскости YOX, поворачивается в процессе вращения цапфы на угол β:

$$\beta = \arctg \frac{\bar{a}_1 - \bar{a}_2}{l},$$

где $\bar{a}_1, \bar{a}_2$ — математические ожидания соответствующих хорд эллипсов 1 и 2 в заданном состоянии; l — длина цапфы.

Максимальный угол

$$\beta_{\max} = \arctg \frac{\bar{a} - \bar{b}}{l},$$

где $\bar{a}, \bar{b}$ — математические ожидания большой и малой полуосей.

Деформация прямоугольной системы координат за счет нарушения ортогональности оси OZ и плоскости YOX накладывает определенный отпечаток на результаты моделирования уравнения образующей катеноида 2 (см. рис. 4). Действительно, отказываясь от введения системы координат YOZ_βX_β, с одной стороны, можно получить более простое уравнение, используя только аппарат аналитической геометрии в пространстве, а с другой стороны, приходится допустить систематическую

погрешность, которая будет зависеть от α*. Учет последней связан с введением корректирующих поправок (коэффициентов) путем идентификации результатов теоретических расчетов и апостериорной информации. Следует отметить, что угол между осями OX', OX'' (новые системы координат Y'OZ'X' и Y''OZ''X''), полученные путем смещения начала координат в центре эллипса 1 и цапфы, показаны на рис. 4) и осью цапфы тоже равен β.

Итак, полагая, что оси OZ и OZ_β совпадают, запишем уравнения эллипсов 1 и 2 в старой системе координат (системе YOZX).

Уравнение эллипса 1 (рис. 5)

$$\frac{y^2}{b^2} + \frac{(z-a)^2}{a^2} = 1$$

также можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} y &= b \cos t; \\ z - a &= a \sin t. \end{aligned} \right\}$$

Уравнение эллипса 2

$$\frac{(y \cos \alpha_0 + z \sin \alpha_0)^2}{b^2} + \frac{(-y \sin \alpha_0 + z \cos \alpha_0 - a - \delta_0)^2}{a^2} = 1$$

можно записать в виде

$$\left. \begin{aligned} y \cos \alpha_0 + z \sin \alpha_0 &= b \cos t; \\ -y \sin \alpha_0 + z \cos \alpha_0 - a - \delta_0 &= a \sin t. \end{aligned} \right\}$$

Эти уравнения записаны для следующих условий:

— исходным положением эллипса 1 является то, которое изображено на рис. 5;

— смещение эллиптических буртов за счет поворота эллипса 2 на угол α₀ вызывает смещение начала координат на величину δ₀.

Нетрудно показать, что δ₀ = $\bar{a}_1 - \bar{a}_2$ (см. рис. 5).

Пусть начальное положение эллипса 1 повернуто на угол α от исходного эллипса, тогда уравнение эллипса 1 будет иметь вид

$$\frac{(y \cos \alpha + z \sin \alpha)^2}{b^2} + \frac{(-y \sin \alpha + z \cos \alpha - a - \delta(\alpha))^2}{a^2} = 1.$$

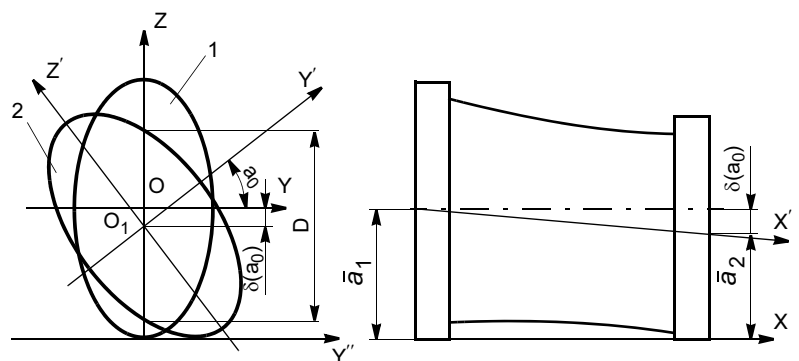


Рис. 5. Начальное положение торцевых эллипсов

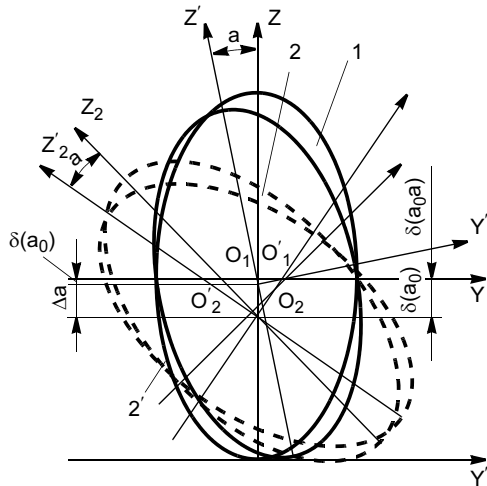


Рис. 6. Положение эллипсов: 1, 1' — первый исходный и первый повернутый на угол α эллипс; 2, 2' — второй исходный и второй повернутый на угол α эллипс

Величина $\delta(\alpha)$ (рис. 6) определяет смещение начала координат по оси OZ . Для вычисления $\delta(\alpha)$ необходимо определить длину соответствующей хорды эллипса 1, повернутого на угол α :

$$D = \sqrt{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha},$$

тогда

$$\delta(\alpha) = a - \sqrt{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha},$$

$$\delta(\alpha_0) = a - \sqrt{a^2 \cos^2 \alpha_0 + b^2 \sin^2 \alpha_0},$$

$$\delta(\alpha + \alpha_0) = a - \sqrt{a^2 \cos^2 (\alpha + \alpha_0) + b^2 \sin^2 (\alpha + \alpha_0)}.$$

Так как эллипс 1 повернут на угол α , то эллипс 2 будет повернут на угол $\alpha + \alpha_0$ и его уравнение примет вид (см. рис. 6):

$$\frac{(y \cos(\alpha + \alpha_0) + z \sin(\alpha + \alpha_0))^2}{b^2} + \frac{(-y \sin(\alpha + \alpha_0) + z \cos(\alpha + \alpha_0) - a - \delta(\alpha))^2}{a^2} = 1.$$

Обозначим $\Delta_\alpha = |\delta(\alpha + \alpha_0) - \delta(\alpha) + \delta(\alpha_0)|$, тогда

$$\Delta_\alpha = \left| \sqrt{a^2 \cos^2 \alpha + b^2 \sin^2 \alpha} - \sqrt{a^2 \cos^2 (\alpha + \alpha_0) + b^2 \sin^2 (\alpha + \alpha_0)} + a - \sqrt{a^2 \cos^2 \alpha_0 + b^2 \sin^2 \alpha_0} \right|.$$

Найдем угол θ , на который следует повернуть ось OX'' (см. рис. 4), чтобы она совпала с осью цапфы. Хотя выше было показано, что угол поворота этой оси незначителен, в расчетах следует иногда давать оценку возможных максимальных отклоне-

ний оси OX'' от оси OX' , так как при организации процесса восстановительной обточки точность обработки поверхности играет доминирующую роль:

$$\theta = \arctg \frac{\Delta_\alpha}{l}.$$

Уравнение кривой 3 — это уравнение катеноида

$$Z'' = mch \frac{X''}{d},$$

где $X'' = X' - \frac{l}{2}$.

Тогда

$$Z' = mch \frac{\left(X' - \frac{l}{2}\right)}{d},$$

где

$$\left. \begin{aligned} Z' &= x \sin \theta + z \cos \theta; \\ X' &= x \cos \theta - z \sin \theta. \end{aligned} \right\}$$

Найдем значения a^* (см. рис. 4): $a^*_{\max} = a$; $a^*_{\min} = b$. Тогда

$$a^* = b + \Delta_\alpha,$$

где b — величина малой полуоси эллипса; Δ_α — угловое смещение оси цапфы.

Тогда уравнение катеноида в системе ZOX имеет следующий вид:

$$x \sin \theta + z \cos \theta - a^* = mch \frac{\left(x \cos \theta - z \sin \theta - \frac{l}{2}\right)}{d}.$$

Однако для получения пространственной картины необходимо учесть трансформацию уравнения с введением третьей координаты y . Общее уравнение поверхности катеноида

$$\sqrt{(z'')^2 + (y'')^2} = mch \frac{x''}{d},$$

т. е.

$$\begin{aligned} \sqrt{y^2 + (x \sin \theta + z \cos \theta - b - \Delta_\alpha)^2} &= \\ &= mch \frac{(x \cos \theta - z \sin \theta - l/2)}{d}. \end{aligned}$$

Параметр m является радиусом вписанного в катеноид цилиндра и определяется эмпирически. Параметр d тоже определяют из экспериментальных данных.

Итак, определено уравнение семейства кривых, которые образуют пространственную поверхность, получаемую от вращения катеноида, расположенного между двумя эллиптическими буртами со смещенными центрами, перемещением его в пространстве на угол β . Обработка данного уравнения на ЭВМ позволяет получить данные для построения поверхности вращения и движения резца.

Т. А. ДУЮН, канд. техн. наук, А. В. ГРИНЕК, инж.
Белгородский ГТУ им. В. Г. Шухова

Особенности токарной обработки поверхности коллекторов электродвигателей постоянного тока

Процесс коммутации в скользящем контакте щеточно-коллекторного узла электродвигателей постоянного тока — сложный процесс, часто сопровождается искрением. Сильное искрение может перейти в круговой огонь, что является серьезным нарушением работы электродвигателя. Качество контактной поверхности коллектора — один из важнейших факторов, влияющих на процесс коммутации и надежность работы щеточно-коллекторного узла.

Недостаточность технологических рекомендаций по изготовлению и обработке коллекторных узлов затрудняет проектирование эффективных технологий. Традиционные зависимости расчета шероховатости при точении дают значения шероховатости, не адекватные полученным на практике. Это связано с особенностями процесса резания при точении коллекторов.

Процесс резания при точении коллекторов имеет существенные отличия. Коллектор представляет периодически неоднородную структуру, состоящую из чередующихся медных и изоляционных пластин. Медь является высокотеплопроводным материалом, поэтому процесс резания проходит при более низких температурах по сравнению с точением сталей. Прерывистый процесс резания приводит к периодическому изменению силы резания, при этом в случае совпадения частоты свободных незатухающих колебаний резца с частотой вынуждающей силы (в данном случае силы резания) возможно развитие автоколебаний резца. Это явление отрицательно сказывается на стойкости инструмента и качестве поверхности.

Максимально допустимое значение скорости, при которой возможно развитие автоколебаний [1],

$$v_{\max} = \frac{2\delta\omega_0 b_n}{10^{-3}(2,6\xi - 1)\delta\omega_0 + 2,3\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}}, \quad (1)$$

где δ — логарифмический безразмерный декремент колебаний; ω_0 — круговая собственная частота незатухающих колебаний резца, $1/c$; b_n — толщина коллекторной пластины, м; ξ — коэффициент усадки стружки.

Для подтверждения и исследования указанных выше явлений необходимо создание математической модели для определения шероховатости при токарной обработке коллекторов. Для выявления зависимости параметра шероховатости от технологических режимов при токарной обработке провели факторный эксперимент второго порядка [2]. В качестве варьируемых факторов выбрали продольную подачу s , скорость резания v и радиус при вершине резца r . При проведении экспериментов использовали конструкцию коллектора тягового электродвигателя постоянного тока ДПЭ-52. Наружный диаметр коллектора 250 мм. В качестве контрольно-измерительной аппаратуры использовали профилометр TIME TR100.

Определяли среднее арифметическое отклонение профиля Ra .

С учетом принятого трехуровневого варьирования и числа исследуемых факторов сформировали матрицы планирования экспериментов.

В таблице приведены значения факторов на основном, верхнем и нижнем уровнях варьирования. По результатам обработки экспериментальных данных получили адекватную математическую модель для расчета параметра шероховатости при точении коллектора:

$$Ra(s, v, r) = 0,85 - 4,003s + 38,353s^2 - 4,277 \cdot 10^{-3}v + 9,71 \cdot 10^{-6}v^2 + 0,441r - 0,06r^2 - 1,07 \cdot 10^{-3}sv - 0,044sr - 3,97 \cdot 10^{-4}vr. \quad (2)$$

Основная дисперсия опытов $Q_R = 3,594$, а остаточная $Q_{\text{ост}} = 0,441$. Вычисленный выборочный коэффициент множественной корреляции $R = 0,944$. Коэффициент R признан значимым, так как значение критерия Фишера, рассчитанное для основной и остаточной дисперсии, $F = 10,88$ больше табличного $F_T = 2,8$. Для полного исследования процесса обработки проанализировали влияние каждого фактора на качество поверхности по полученным формулам.

На рис. 1, а приведена зависимость параметра шероховатости от подачи при сочетании нижнего и верхнего уровней варьирования двух других факторов. Видно, что с увеличением подачи параметр шероховатости поверхности увеличивается. Это совпадает с известным общим теоретическим положением. Изменение скорости резания и радиуса закругления при вершине резца также влияет на шероховатость. При этом общий интервал изменения параметра ше-

Уровень факторов	Кодовое обозначение	s , мм/об	v , м/мин	r , мм
		x_1	x_2	x_3
Верхний	+1	0,2	465	5
Нижний	-1	0,05	155	2
Основной	0	0,125	310	3,5
Интервал	Δx_i	0,075	155	1,5

роховатости поверхности остается практически постоянным. Наблюдается его снижение при увеличении скорости резания и радиуса закругления вершины резца.

На рис. 1, б приведена зависимость параметра шероховатости от радиуса при вершине резца при различных значениях подачи. Видно, что при увеличении радиуса при вершине резца параметр шероховатости поверхности уменьшается.

На рис. 2, 3 приведены зависимости параметра шероховатости

от скорости резания. Функция имеет экстремум, что подтверждает предположение о том, что скорость резания влияет на шероховатость неоднозначно.

Полученная зависимость имеет минимум при $v = 325$ м/мин, $s = 0,05$ мм/об и $r = 5$ мм. При скорости резания более 325 м/мин высота микронеровностей возрастает.

При расчете скорости, при которой возникают автоколебания, по зависимости (1) определили максимальную скорость безвиб-

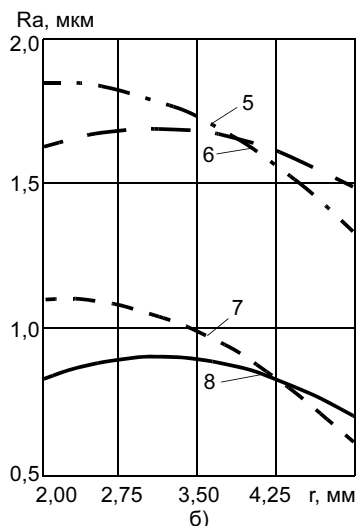
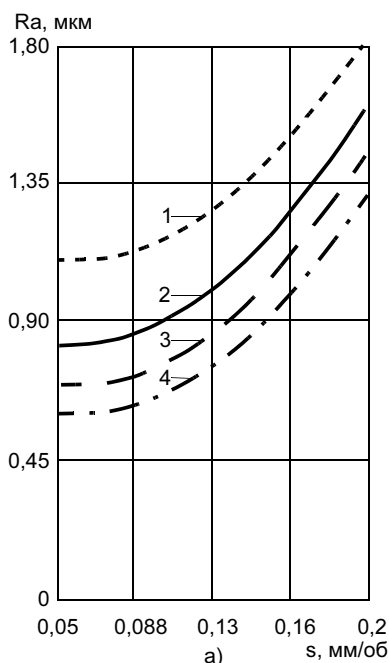


Рис. 1. Зависимость параметра шероховатости поверхности от подачи (а) и радиуса при вершине резца (б): а — 1 — $v = 465$ м/мин, $r = 2$ мм; 2 — 155 м/мин, 2 мм; 3 — 155 м/мин, 5 мм; 4 — 465 м/мин, 5 мм; б — 5 — $s = 0,2$ мм/об, $v = 465$ м/мин; 6 — 0,2 мм/об, 155 м/мин; 7 — 0,05 мм/об, 455 м/мин; 8 — 0,05 мм/об, 155 м/мин

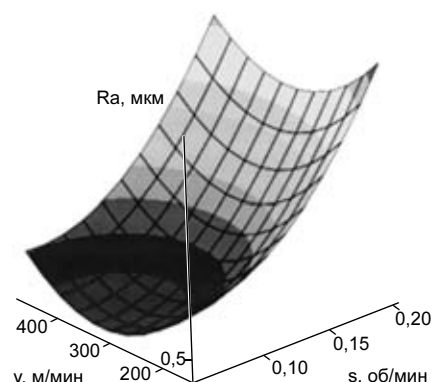


Рис. 2. Поверхность отклика в зависимости от скорости резания и подачи при $r = 3,5$ мм

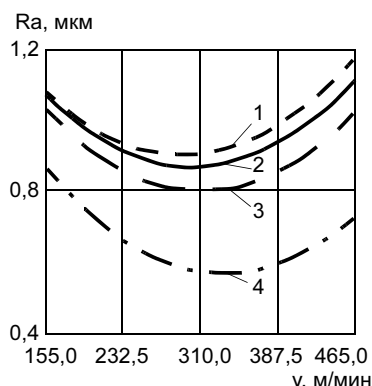


Рис. 3. Зависимость параметра шероховатости от скорости резания: 1—4 — r равен 3, 2, 5 и 4 мм соответственно

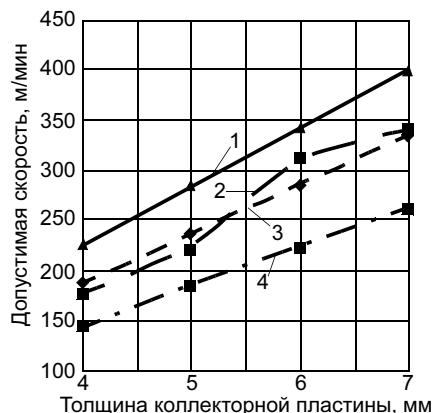


Рис. 4. Номограммы для определения максимально допустимой скорости резания в зависимости от толщины коллекторной пластины: 1 — державка сечением 25×20 мм, вылет резца 25 мм; 2 — 25×20 мм, 50 мм; 3 — 18×20 мм, 18 мм; 4 — 18×12 мм, 36 мм

рационного резания 332 м/мин. Можно сделать вывод о том, что экспериментальная зависимость подтверждает теоретическое предположение о возможном отрицательном влиянии увеличения скорости резания при точении контактной поверхности коллектора.

На рис. 4 приведены номограммы для определения максимальной скорости резания.

Полученные номограммы позволяют без дополнительных вычислений определить максимальную скорость резания при условии отсутствия автоколебаний [3].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Васин С. А. Прогнозирование виброустойчивости инструмента при точении и фрезеровании. Сер. "Библиотека инструментальщика". М.: Машиностроение, 2006. 384 с.
2. Адлер Ю. П., Маркова Е. А., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1971. 284 с.
3. Дуюн Т. А., Чепчугов М. С., Гринек А. В. Условие отсутствия автоколебаний при механической обработке коллекторов электродвигателей постоянного тока // Научные исследования, наносистемы и ресурсосберегающие технологии в стройиндустрии. Белгород: Изд-во БГТУ им. В. Г. Шухова, 2007. С. 112—115.

В. Г. ДЕМИН, аспирант, Я. Ю. ПИКАЛОВ, канд. техн. наук, С. Н. ШАТОХИН, канд. техн. наук
Сибирский федеральный университет

Проектирование адаптивных гидростатических опор для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков

В работах [1, 2] приведены результаты разработки и исследования адаптивных гидростатических опор нового типа, выполненных в Сибирском федеральном университете (СФУ), для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков. Основная конструктивная особенность новых опор заключается в использовании встроенных плавающих регуляторов нагнетания смазки, которые во всем расчетном диапазоне нагрузок обеспечивают режим отрицательной податливости. В сравнении с другими гидростатическими опорами, применяемыми в шпиндельных узлах и направляющих металлорежущих станков, новые опоры имеют значительно лучшие нагрузочные, скоростные и энергетические характеристики.

Адаптивные гидростатические опоры нового типа для шпиндельных узлов. В СФУ разработаны, исследованы и защищены патентами конструкции радиальных и радиально-осевых адаптивных гидростатических шпиндельных опор с плавающими регуляторами нагнетания смазки¹.

На рис. 1 приведены конструктивный вариант радиальной опоры и график ее нагрузочной характеристики (для сравнения дан также график нагрузочной характеристики гидростатической опоры пассивного типа). В корпусе 1 шпиндельного узла (см. рис. 1, а) установлена неподвижная опорная втулка 2,

состоящая из двух частей, между которыми имеется радиальная дросселирующая щель. С обеих сторон втулки установлены неподвижные опорные фланцы 3. Между фланцами расположен плавающий кольцевой регулятор 4, который имеет дросселирующие сопла в средней плоскости и отделен дросселирующими щелевыми зазорами от втулки, фланцев и шпинделя 5.

Опора обладает следующими преимуществами:

- небольшое число деталей простой формы обеспечивает компактность и технологичность конструкции;

- плавающий регулятор нагнетания смазки обеспечивает нагрузочную характеристику с большим диапазоном отрицательных эксцентриситетов (см. рис. 1, б) и позволяет в 1,5—2 раза увеличить

реальную нагрузочную способность опоры;

- отсутствие несущих карманов обеспечивает хорошие динамические характеристики, исключает кавитацию и турбулентность в смазке при высокой частоте вращения шпинделя, допускает возможность использования как жидкой, так и газообразной смазки;

- авторотация регулятора при вращении шпинделя исключает облитерацию дросселирующих щелевых зазоров и существенно снижает фрикционные потери мощности.

Проектирование шпиндельных узлов с гидростатическими опорами нового типа включает выбор оптимальных параметров самой опоры с учетом особенностей станка, определение оптимальных геометрических размеров шпиндель-

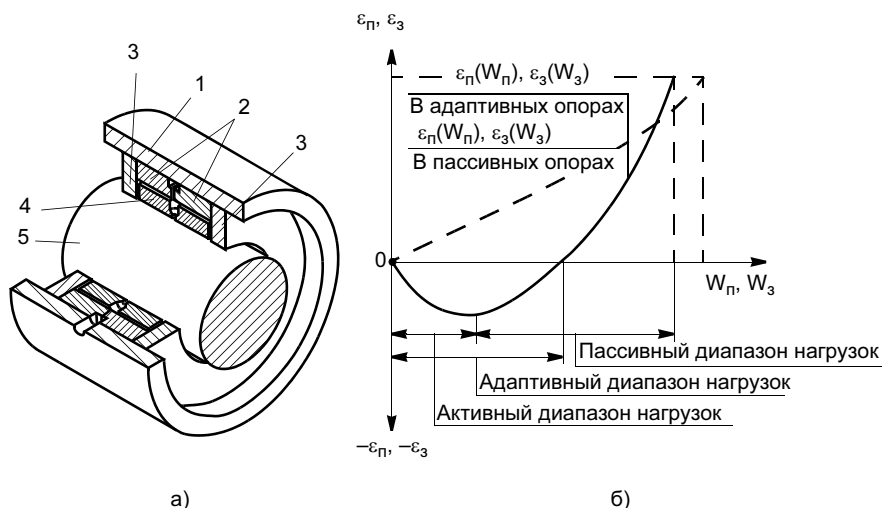


Рис. 1. Конструкция (а) и нагрузочная характеристика (б) радиальной адаптивной шпиндельной опоры нового типа

¹ Патент 2208723, 2211385, 2260722, 52618 (РФ).

ного узла для минимизации прогиба Y_0 переднего конца шпинделя (рис. 2) и уточнение ширины L_1 передней и задней опор с учетом компоновки шпиндельного узла.

Для определения оптимального сочетания нагрузочных и энергетических характеристик шпиндель-

ных опор с учетом эксплуатационных особенностей станка на этапе 1 используется многопараметрическая оптимизация по комплексному критерию качества:

$$X = S_{ад}^{\gamma} / \bar{N}_{\Sigma}^{1-\gamma},$$

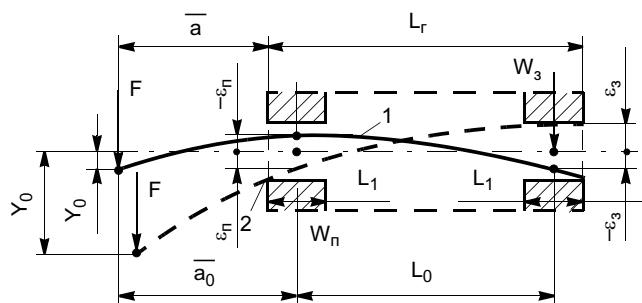


Рис. 2. Расчетная схема шпиндельного узла: 1, 2 — шпиндель на адаптивных и пассивных опорах соответственно

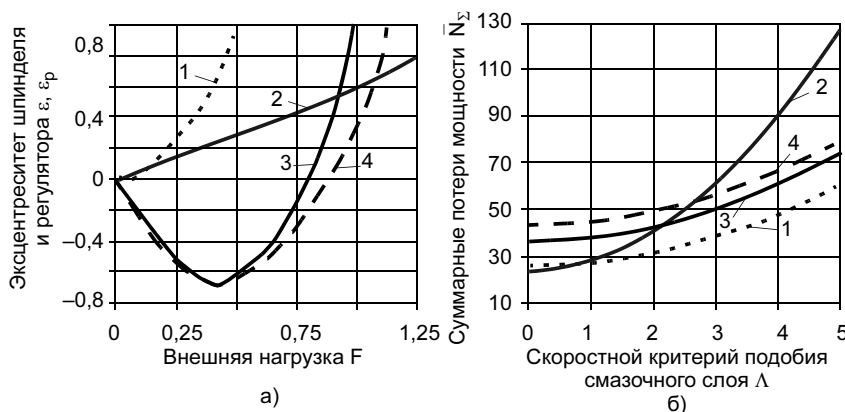


Рис. 3. Статические характеристики радиальной адаптивной опоры (а, б) для различных вариантов оптимизации: 1, 3, 4 — γ равен соответственно 0, 0,5 и 1,0; 2 — пассивная гидростатическая опора

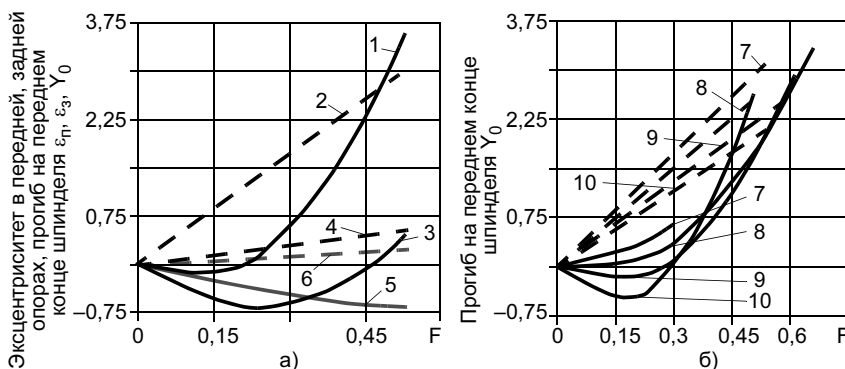


Рис. 4. Нагрузочная характеристика шпиндельного узла с адаптивными опорами: а — 1, 2 — прогиб $Y_0(F)$ шпинделя с адаптивными и пассивными опорами соответственно; 3, 4 — эксцентриситет $\varepsilon_n(F)$ в передней адаптивной и пассивной опорах соответственно; 5, 6 — эксцентриситет $\varepsilon_3(F)$ в задней адаптивной и пассивной опорах соответственно; б — штриховые линии — шпиндель с пассивными опорами, сплошные — с адаптивными; 7—10 — L_r соответственно равна 10, 8, 6 и 4

где $S_{ад}$ — площадь, ограниченная адаптивным участком кривой нагрузок (см. рис. 1); $\bar{N}_{\Sigma}$ — суммарные потери мощности на нагнетание и трение в тонком слое смазки; γ — весовой коэффициент, устанавливающий значимость нагрузочных и энергетических характеристик (для тяжело нагруженных и тихоходных шпиндельных узлов можно принять $0,5 < \gamma \leq 1$, а для легко нагруженных и быстроходных $0 \leq \gamma < 0,5$).

На основе проведенных ранее исследований создана инженерная методика проектирования адаптивных гидростатических шпиндельных опор нового типа, которая позволяет с помощью разработанной таблицы выбрать оптимальное сочетание параметров опоры и определить ее основные эксплуатационные характеристики (рис. 3).

На этапе 2 при заданной длине консольной части шпинделя $\bar{a}_0$ (см. рис. 2) определяется оптимальное значение межопорного расстояния L_0 , обеспечивающее максимальную жесткость шпиндельного узла (с практической точки зрения важен габаритный размер $L_r = L_0 + L_1$ корпуса шпиндельного узла, при этом вылет из корпуса переднего конца шпинделя выражается как $\bar{a} = \bar{a}_0 - L_1$).

Программа расчета нагрузочных характеристик шпиндельного узла с адаптивными опорами нового типа содержит процедуры и функции, необходимые для исключения возможности кромочного контакта опоры и шпинделя из-за изгиба и перекоса последнего при действии консольной нагрузки.

На рис. 4 приведены нагрузочные характеристики шпиндельного узла с адаптивными гидростатическими опорами нового типа. Для сравнения приведены также характеристики шпиндельного узла на гидростатических опорах пассивного типа.

Анализ графиков рис. 4, а показывает, что практически во всем диапазоне внешних нагрузок прогиб Y_0 шпинделя с адаптивными

опорами нового типа меньше, чем у шпинделя с гидростатическими опорами пассивного типа, при этом задняя опора всегда работает в активном режиме, обеспечивающем отрицательную податливость.

Сравнение нагрузочных характеристик шпиндельного узла с адаптивными и гидростатическими опорами при различных значениях размера L_r корпуса шпиндельного узла (см. рис. 4, б) позволяет сделать следующие выводы:

— наилучшим можно считать значение $L_r = 6$, так как при малых внешних нагрузках F обеспечиваются малые (по модулю) отрицательные значения прогиба Y_0 ;

— при $L_r = 8$ шпиндельный узел имеет максимальный (из рассмотренных) диапазон рабочих нагрузок;

— при $L_r = 10$ диапазон рабочих нагрузок наименьший, так как возможная точка кромочного контакта находится на внутреннем торце передней опоры.

На этапе 3 для выбранного ранее значения L_r определяется оптимальное значение относительной ширины L_1 опоры. Анализ нагрузочных характеристик шпиндельного узла при различных значениях L_1 (рис. 5) показывает, что общепринятое для гидростатических шпиндельных опор значение

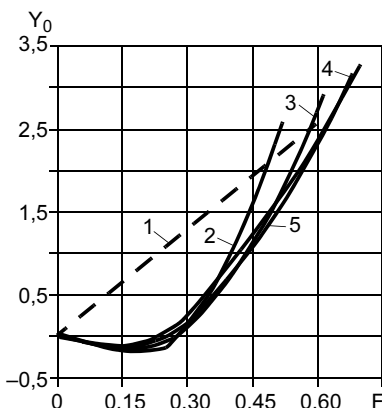


Рис. 5. Зависимость прогиба $Y_0(F)$ шпинделя с адаптивными опорами (2—5) и с пассивными (1) от относительной ширины L_1 адаптивных опор: 2—5 — L_1 равна 0,75, 1,00, 1,25 и 1,50 соответственно

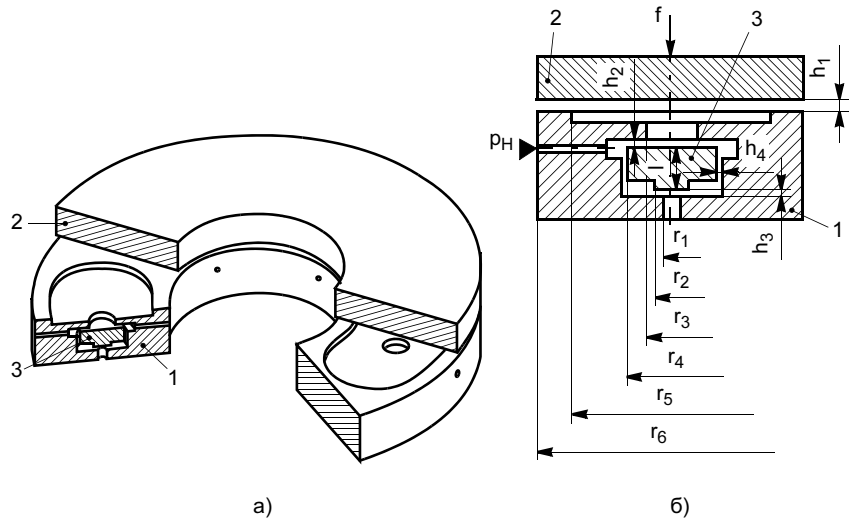


Рис. 6. Незамкнутая круговая гидростатическая направляющая с плавающими регуляторами нагнетания смазки (а) и ее модельная опора (б)

$L_1 = 0,75 \div 1,00$ при использовании адаптивных опор нового типа может быть увеличено на 40—50 %. В настоящее время программа расчета шпиндельных узлов с опорами нового типа дополняется модулями, необходимыми для проведения многопараметрической оптимизации характеристик узла с учетом динамических критериев.

Направляющие с адаптивными гидростатическими опорами нового типа. Результаты, полученные для адаптивных шпиндельных гидростатических опор нового типа, послужили основой для разработки и исследования адаптивных гидростатических опор с плавающими регуляторами нагнетания смазки для направляющих металлорежущих станков.

На рис. 6, а приведена конструкция незамкнутой круговой гидростатической направляющей с плавающими регуляторами нагнетания смазки. Она имеет неподвижный корпус 1, на рабочей поверхности которого выполнены несущие карманы, вращающуюся планшайбу 2 и автономные плавающие регуляторы 3, расположенные в проточных полостях корпуса на входе каждого несущего кармана. Смазка под давлением нагнетания поступает в несущие карманы через регуляторы и вытекает через дроссе-

лирующий щелевой зазор между корпусом и планшайбой. Отработка конструкции регуляторов и оптимизация их параметров выполнены на примере модельной гидростатической опоры (см. рис. 6, б).

Модельная опора работает следующим образом: смазка под постоянным давлением $p_H = \text{const}$ нагнетается в кольцевую канавку, выполненную на стыке радиального h_4 и осевого h_2 дросселирующих зазоров регулятора. При этом дросселирующий зазор h_2 управляет нагнетанием смазки в несущий карман, а дросселирующий зазор h_4 — в карман регулятора ($r_2 \leq r \leq r_4$), расположенный на его нижнем торце. Смазка из кармана регулятора поступает на слив через осевой дросселирующий зазор h_3 между нижним торцом регулятора и полостью корпуса.

При осевом смещении регулятора гидравлическое сопротивление радиального дросселирующего зазора h_2 остается постоянным, а сопротивление осевых дросселирующих зазоров h_2 и h_3 меняется. При этом взаимодействие дросселирующих зазоров h_3 и h_4 создает упругий гидростатический подвес регулятора (гидравлическую пружину) и обеспечивает активную компенсацию расхода смазки в несущем кармане.

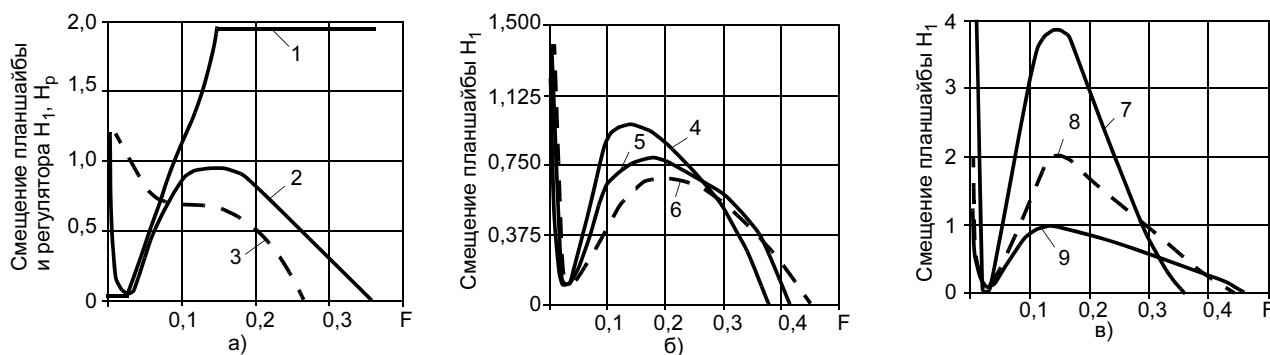


Рис. 7. Зависимость нагрузочной характеристики от параметров модельной адаптивной опоры: а — 1 — регулятор; 2, 3 — адаптивная и пассивная опоры; б — 4—6 — R_4 соответственно равен 0,8, 0,95 и 0,90; в — 7—9 — H_{psum} соответственно равна 3, 2 и 1

Исследование опоры выполняли на основе математической модели, включающей уравнения силового равновесия планшайбы и регулятора, а также уравнения неразрывности течения смазки на стыках между дросселирующими сопротивлениями. Распределение давления смазки в дросселирующих щелевых зазорах определяли, решая краевые задачи для стационарного уравнения Рейнольдса в полярной системе координат z, r, φ . Исследование выполняли с использованием безразмерных значений параметров и характеристик.

В связи с нелинейной зависимостью безразмерного рабочего зазора опоры $H_1 = h_1/(0,002r_0)$ от безразмерной нагрузки $F = f(p_n r_0^2)$ прямое определение функции $H_1(F)$ по уравнениям математических моделей не представляется возможным, поэтому численное исследование проводили с использованием обратного алгоритма (находили функцию $F(H_1)$).

На первом этапе работы программы по известным координатам одной точки нагрузочной характеристики определяли безразмерное значение суммарного осевого дросселирующего зазора регулятора $H_{psum} = (h_2 + h_3)/(0,002r_0)$. На втором этапе определяли точки нагрузочной кривой, соответствующие активному диапазону работы регулятора. Для каждого значения за-

зора $H_2 = h_2/(0,002r_0)$, изменяемого с равным шагом в интервале $0 \leq H_2 \leq H_{psum}$, определяли значения дросселирующего зазора H_1 и внешней нагрузки F . На третьем этапе строили участок кривой в диапазоне малых нагрузок. Изменяя с равным шагом зазор H_1 , определяли значение безразмерной нагрузки при крайнем верхнем положении регулятора. На четвертом этапе строили пассивный участок нагрузочной кривой при крайнем нижнем положении регулятора.

На рис. 7, а видно, что при отсутствии нагрузки регулятор занимает крайнее верхнее положение ($H_2 \approx 0$), а зазор в опоре стремится к бесконечности. При достижении определенной нагрузки регулятор смещается вниз, при этом податливость опоры имеет отрицательное значение. Точки перелома кривой $H_2(F)$ свидетельствуют о касании регулятора корпуса. При этом регулятор остается неподвижным и опора работает в режиме положительной податливости.

Нагрузочную способность опоры можно существенно повысить путем увеличения площади несущего кармана, но это приводит к уменьшению перемещения в режиме отрицательной податливости (рис. 7, б).

С ростом суммарного дросселирующего зазора H_{psum} увеличивается перемещение опоры в режиме отрицательной податливости

(рис. 7, в), что может быть полезно для компенсации упругих деформаций несущей системы станка.

Проведенные исследования показали, что направляющие с адаптивными опорами нового типа имеют большую несущую способность, обладают эффектом отрицательной податливости. Установлено также, что с ростом нагрузки уменьшаются суммарные потери мощности.

В настоящее время проводится разработка и исследование замкнутых направляющих с адаптивными гидростатическими опорами нового типа, способных воспринимать осевые нагрузки в обоих осевых направлениях, и комбинированных, воспринимающих осевые, радиальные и моментные нагрузки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пикалов Я. Ю., Шатохин С. Н., Демин В. Г. Адаптивные бесконтактные опоры скольжения с плавающими регуляторами нагнетания смазки (гидростатические, аэростатические) для шпиндельных узлов и направляющих металлорежущих станков // Технология машиностроения. 2006. № 9. С. 29—33.
2. Пикалов Я. Ю., Шатохин С. Н. Конструкции и характеристики адаптивных гидростатических шпиндельных опор с плавающим регулятором нагнетания смазки // СТИН. 2006. № 5.
3. Шатохин С. Н. Расчет и минимизация потерь мощности в гидростатических подшипниках // СТИН. 1989. № 9. С. 16—19.

Ю. И. ГОРДЕЕВ, канд. техн. наук, А. К. АБКЯН, канд. техн. наук, Г. М. ЗЕЕР, канд. техн. наук
Сибирский федеральный университет, Политехнический институт (Красноярск)

Перспективы использования нанопорошков для повышения эксплуатационных характеристик твердосплавного инструмента

Цель работы — теоретическое обоснование, разработка технологии модифицирования нанопорошками твердосплавных композитов для повышения их качественных характеристик.

Анализ известных моделей, описывающих прочность и механизмы разрушения твердосплавных композитов, свидетельствует, что, несмотря на различия в подходах, большинство исследователей [1, 2] признают доминирующее влияние на качество сплава таких структурных параметров, как размеры и смежность (контактность) карбидных зерен, размеры и свойства связующего. Одним из эффективных способов повышения качества твердосплавных инструментов является использование при их изготовлении наноразмерных порошков карбидной фазы. Однако это существенно увеличивает стоимость изделий по сравнению с традиционно используемыми материалами и технологиями.

При подготовке и планировании исследований учитывали, что качество твердых сплавов в основном определяется пластическими и прочностными характеристиками связующей фазы. Свойства материала связки в свою очередь изменяются с изменением толщины металлической прослойки между карбидными зернами. Предполагалось, что нанопорошки (например, Al_2O_3 или ZrO_2), однородно распределенные в объеме связующего, уменьшают средний размер прослойки, что должно способствовать повышению прочности собственно связки и композита в целом. Включения тугоплавких твердых частиц в мягких прослойках связки позволяют повысить стойкость против износа при повышенных температурах, например при высоко-

скоростном резании, и, кроме того, являются барьерами на пути распространения микротрещин (т. е. увеличиваются прочность и трещиностойкость).

Геометрическая модель трехфазного гетерогенного твердосплавного композита приведена на рис. 1. Задачу обеспечения простоты прочностных и эксплуатационных характеристик решали расчетными (предварительный) и экспериментальными методами.

Структурные параметры l_1, l_2, l_3 гетерогенного композита могут быть определены из следующих выражений:

$$l_1^3 + 3d_1 l_1^2 + 3\bar{d}_1^2 l_1 = \left(\frac{\beta_1}{K\beta_0} - 1 \right) \bar{d}_1^3;$$

$$l_2^3 + 3\bar{d}_2 l_2^2 + 3\bar{d}_2^2 l_2 = \left(\frac{\beta_2(1-K_1)}{\beta_4 K_2} - 1 \right) \bar{d}_2^3;$$

$$l_3 = \frac{l_1}{2} + X_c - \frac{\bar{d}_2}{2} = \frac{3}{4}(l_1 - \bar{d}_2), \quad (1)$$

где d_1, d_2 — средние размеры частиц WC и нанопорошков Al_2O_3 (ZrO_2) соответственно; K_1, K_2 — объемные доли частиц WC и нанопорошков; $\beta_1, \beta_2, \beta_4, \beta_0$ —

коэффициенты, учитывающие неоднородность формы частиц и структурных фрагментов; X_c — эмпирический коэффициент.

Эффективную толщину кобальтовой прослойки λ выбирали на основе вероятностного подхода. При этом в качестве критерия применимости той или иной формулы при расчетах λ использовали концентрацию сверхтонких частиц в единичном объеме прослойки со стороны l_1 . В случае если количество частиц n_2 в единичном объеме прослойки l_1^3 меньше единицы, то эффективный размер прослойки

$$\lambda = l_1(1 - n_2) + l_3 n_2. \quad (2)$$

При $n_2 > 1$ величина λ может принимать значения l_1 и l_2 с вероятностью, пропорциональной концентрации ультрадисперсных частиц:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n P_i l_i = P_1 l_1 - P_2 l_2;$$

$$P_1 = \frac{n_0}{n_0 + n_1};$$

$$P_2 = \frac{n_0}{n_0 + n_2}, \quad (3)$$

где n_0 — количество ячеек с объемом l_1^3 .

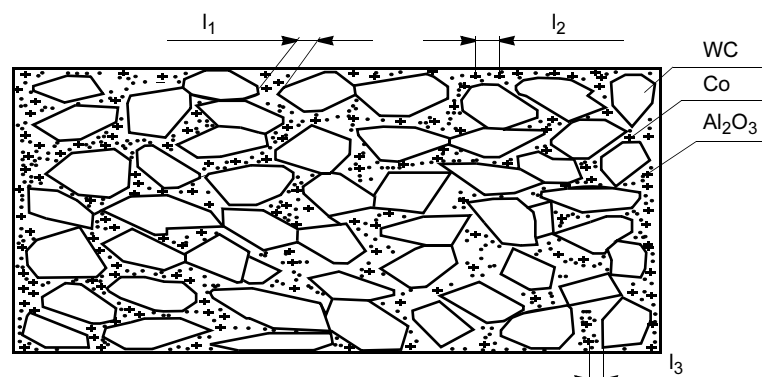


Рис. 1. Геометрическая модель трехфазного гетерогенного твердосплавного композита WC—Co— Al_2O_3

Влияние добавок наночастиц на трещиностойкость трехфазных твердосплавных композитов оценивали с помощью разработанной геометрической модели и формул для определения трещиностойкости, предложенных в работе [1]. Результаты вычислений (рис. 2) свидетельствуют, что структурные параметры ($l_1, l_2, l_3, n_2, \lambda$) и трещиностойкость изменяются в зависимости от соотношения размеров и объемных долей карбидной и наноразмерной фаз (d_1, d_2, K_1, K_2). Расчетными методами установили оптимальное (с точки зрения прироста прочности) содержание

добавок, а также критическое (пороговое) содержание.

Исследовали твердосплавные композиты на основе WC—Co, WC—TiC—Co, TiCN—Ni—Mo, упрочненные нанопорошками Al_2O_3 и ZrO_2 .

Опытные образцы и промышленные партии режущего и волочильного инструмента изготовили в НТЦ Кировоградского завода твердых сплавов и лаборатории "Порошковая металлургия" Красноярского государственного технического университета по традиционной технологии; порошки карбидов, металла-связки и добавок нанопорошков подвергали совместному мокрому размолу-смешиванию в шаровой мельнице и последующему пластифицированию 4 %-ным раствором синтетического каучука в бензине, сушке, просеву с протиркой через сито. При этом состав смеси варьировали путем изменения содержания связки в пределах 4—20 % и добавок нанопорошков Al_2O_3 от 0,05 до 0,5 %.

Приготовленные смеси использовали для изготовления штабиков для проведения испытаний на изгиб (ГОСТ 20019—94), резцовых пластин формы 0227 (ГОСТ 25395—92), четырех- и пятигранных резцо-

вых пластин (ГОСТ 19052—90, 19065-90), твердосплавных оправок и волок для определения коэффициента стойкости, таблеток размером $\varnothing 10 \times 10$ мм для измерения трещиностойкости по методу Палмквиста (K_{1c}) и износостойкости, а также исследования микроструктуры.

Необходимо отметить, что для получения достоверных данных о влиянии нанопорошков на свойства твердых сплавов каждая серия испытаний (начиная с подготовки исходных порошков) сопровождалась параллельным изготовлением контрольных образцов стандартных сплавов. Исследовали твердые сплавы ВК6, ВК8, ВК10КС, ВК15, Т15К6, КНТ16, ЛЦК20, ТН20 в сравнении с образцами аналогичных базовых составов, модифицированных добавками нанопорошков Al_2O_3 . В связи со значительным объемом и трудоемкостью проведения сравнительных испытаний наибольший объем экспериментальных данных в основном относится к модифицированным композитам на базе твердых сплавов группы ВК.

Результаты экспериментов, проведенных на Кировоградском заводе твердых сплавов (см. таблицу) показали, что введение в состав твердых сплавов нанопорошков

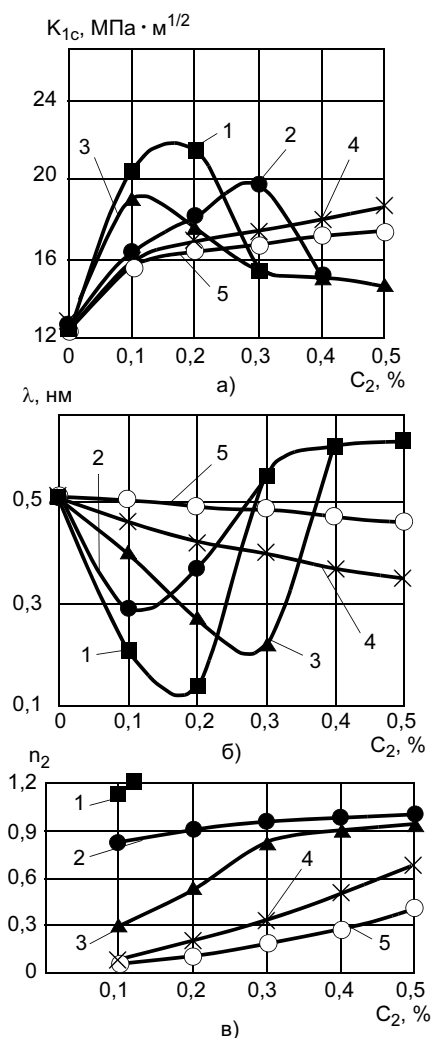


Рис. 2. Зависимость трещиностойкости K_{1c} (а), толщины прослойки λ (б) и количества частиц нанопорошков n_2 (в) в единичном объеме прослойки l_1^3 от содержания добавок наночастиц: 1—5 — d_1 равен 5, 4, 3, 2 и 1 мкм соответственно

Сплав	Плотность ρ , г/см ³	Твердость, HRA	Прочность на изгиб, МПа	Коэрцитивная сила H_c , эрстед	d_{cp} , мкм
ВК6	14,66	89,8	1650	127	2,25
ВК6*	14,68	89,5	1710	128	2,10
ВК6	14,71	89,5	1430	122	2,47
ВК6*	14,53	89,5	1850	123	2,21
ВК8	14,28	89,5	1440	138	—
ВК8*	14,61	89,3	1940	111	—
ВК8	14,25	89,5	1280	132	2,38
ВК8*	14,47	89,2	1740	106	2,27
ВК15	14,10	86,5	2100		2,51
ВК15*	14,00	86,5	2240		2,33
ВК10КС	14,49	87,3	2100	98	4,03
ВК10КС*	14,21	87,4	2450	79	3,87
Т15К6	11,12	91,5	1060	160	$d_\alpha = 2,3$ $d_\gamma = 3,8$ $\gamma/\alpha = 1,66$
Т15К6*	11,11	91,5	1330	162	$d_\alpha = 2,0$ $d_\gamma = 4,25$ $\gamma/\alpha = 2,12$
Т15К6**	11,09	91,5	1770	163	$d_\alpha = 2,18$ $d_\gamma = 4,56$ $\gamma/\alpha = 2,08$

* Сплав с добавками Al_2O_3 .

Al_2O_3 (с основным размером около 0,1 мкм) способствует приросту прочностных характеристик в 1,5—1,8 раза, а также некоторому снижению размера карбидных зерен у модифицированного сплава, что можно объяснить торможением процессов перекристаллизации через кобальтовую фазу вследствие присутствия в ней нанопорошков Al_2O_{3f} .

При проведении экспериментов содержание нанопорошков Al_2O_3 варьировали от 0 до 0,5 %.

Зависимость предела прочности на изгиб от содержания добавок нанопорошков приведена на рис. 3. Экстремальный характер изменения прочности с увеличением содержания нанопорошков Al_2O_3 объясняется, вероятно, тем, что их содержание в единичном объеме (при $C_2 \sim 0,3$ %) связи достигает значений, при которых резко возрастает число межчастичных контактов $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—Al}_2\text{O}_{3f}$, в процессе спекания образуются конгломераты с развитой внутренней микропористостью, которые являются источниками зарождения микротрещин, что и способствует охрупчиванию материала. Результаты испытаний образцов композитов $\text{WC—Co—Al}_2\text{O}_{3f}$ в условиях граничного трения по абразивной ленте также показали возможность улучшения износостойкости твердых сплавов за счет их модифицирования включениями нанопорошков. Минимальные значения износа наблюдаются примерно при том содержании добавок, которые обеспечивают прирост прочности по аналогичным причинам. Дополнительный вклад в повышение износостойкости материала вносит, по-видимому, сопротивляемость истиранию самого оксида алюминия, значительная его микротвердость: $H_{\mu\text{Al}_2\text{O}_3} = 18\div 20$ ГПа, $H_{\mu\text{WC}} = 8\div 10$ ГПа.

Но более существенной причиной повышенной износостойкости является, вероятно, изменение механизма износа материала в целом: включения твердых частиц Al_2O_{3f} способствуют дисперсному упрочнению кобальтовой связи за счет

утолщения прослойки, увеличивает сопротивление сплава сдвиговым деформациям, уменьшается выкрошивание карбидных зерен. Особый интерес с точки зрения прогнозирования качества твердого сплава представляют данные исследований вязкости разрушения материала по методу Палмквиста (рис. 4) в сочетании с полученными микроструктурами. Трещины, которые образуются в материале в результате внедрения индентора, привлекают к себе внимание главным образом потому, что являются потенциальным способом определения прочности, эксплуатационной стойкости материала, поскольку отражают изменения в механизмах разрушения, соответствующих различным типам структуры. В связи с этим целесообразно проанализировать измене-

ния вязкости разрушения сплава при введении добавок нанопорошков в сочетании с результатами исследования микроструктуры.

Необходимость более подробного исследования трещиностойкости по Палмквисту объясняется также и тем, что можно сравнить эмпирические значения K_{1c} с расчетными (см. рис. 4), полученными по формулам вероятностно-статистической модели.

Значения коэффициента интенсивности напряжений K_{1c} (трещиностойкости) на рис. 4 подтверждают возможность увеличения вязкости разрушения при модифицировании композита WC—Co нанопорошками Al_2O_{3f} . Металлографические исследования микроструктуры на оптическом и растровом электронном микроскопах, в том числе с использованием методов микрорентгеноспектрального фазового анализа, свидетельствуют о том, что нанопорошки Al_2O_{3f} однородно распределены по объему кобальтовой связи. При этом количество конгломератов из нанопорошков увеличивается пропорционально увеличению содержания добавок.

Результаты исследования микроструктуры показали, что введение нанопорошков не только увеличивает прочность твердого сплава, но и изменяет механизмы разрушения композита. На рис. 5 а, б приведены трещины Палмквиста, распространяющиеся от угла отпечатка пирамидки Виккерса, которые свидетельствуют, что у модифицированного твердого сплава с введением в его структуру частиц Al_2O_{3f} не только уменьшается длина трещин (что говорит об увеличении вязкости материала), но изменяется характер ее распространения. Траектория трещины может иметь рваный, ступенчатый вид.

На рис. 4 приведены сравнительные данные расчетных и экспериментальных исследований трещиностойкости, подтверждающие целесообразность использования в качестве добавок частиц по возможности меньшего среднего размера, а также удовлетво-

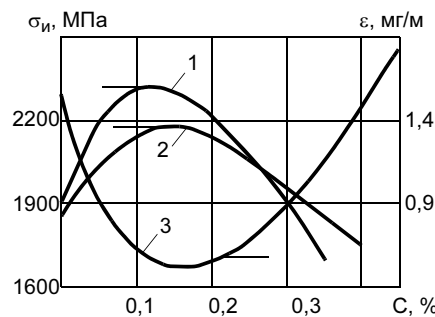


Рис. 3. Зависимость прочности на изгиб σ (1, 2) и относительного износа ε (3) твердосплавного композита от содержания C и среднего размера частиц нанопорошков: 1, 2 — d равен 0,05 и 0,1 мкм соответственно

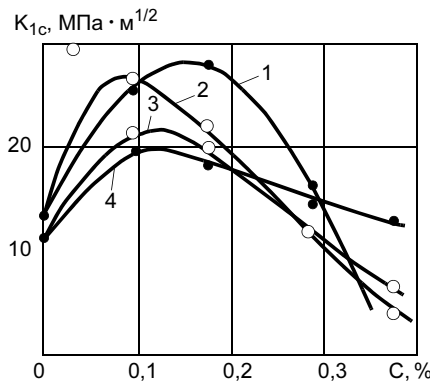


Рис. 4. Зависимость трещиностойкости K_{1c} композита WC—Co от содержания и размера нанопорошка Al_2O_{3f} : 1, 4 — расчетные кривые; 2, 3 — экспериментальные; 1, 2 — d равен 0,05 мкм соответственно; 3, 4 — 0,1 мкм

рительную сходимость расчетной и эмпирической кривых, т. е. пригодность разработанной модели для прогнозирования свойств твердых сплавов, модифицированных нанопорошками.

Результаты компьютерного анализа изображений структуры показывают, что модифицирование твердого сплава нанопорошками способствует снижению средней толщины прослойки связующей и

контактности зерен карбидной фазы, что в соответствии с представлениями механики разрушения и является причиной повышения прочностных характеристик сплава.

Экспериментальные исследования по оптимизации составов, технологии изготовления и определению перспективных областей применения режущего инструмента из модифицированных нанопорошками оксидов твердых сплавов про-

водили совместно с Кировоградским заводом твердых сплавов.

Испытания опытно-промышленных партий инструмента проводили на Ярославском моторостроительном заводе, в ПО "Красмашзавод", ПО "Воткинский завод", на Первоуральском новотрубном заводе, в Казанском моторостроительном производственном объединении, на Кувшинском заводе прокатных валов, в концерне "ИНТОС" (Москва), на заводе "Уралгидромаш" (Сысерть), а также в НИТИ "Прогресс" (Ижевск), Московском институте теплотехники, ПНИТИ (Пермь), МИФИ-2 (Свердловск—45).

При малых скоростях резания и на черновых и обдирочных операциях эффект от легирования не проявлялся. В то же время на повышенных скоростях по сравнению с используемыми на базовых твердых сплавах при непрерывном точении стойкость модифицированного твердого сплава выше. Экономическая эффективность резания определяется снижением основного времени.

Основным критерием качества новых твердых сплавов (в том числе и целесообразности их модифицирования нанопорошками) являются их эксплуатационные характеристики. Результаты испытаний металлорежущего инструмента показали, что модифицирование нанопорошками твердых сплавов всех марок позволяет увеличить коэффициент относительной стойкости: WC—Co—0,25 % Al_2O_{3f} — в 1,3—2 раза; WC—TiC—Co—нанопорошки Al_2O_{3f} — в 1,7—2,5 раза; TiC—TiN—Ni—Mo—нанопорошки Al_2O_{3f} — в 2,0—6,0 раз (рис. 6).

Установлена устойчивая тенденция увеличения коэффициента относительной стойкости при повышении скорости резания. Косвенным путем подтверждено снижение адгезионного изнашивания у сплавов всех марок, модифицированных нанопорошками Al_2O_{3f} (по снижению параметра шероховатости Ra поверхности обрабатываемого материала) (рис. 7).

Разработанные составы и технологии применяли при изготов-

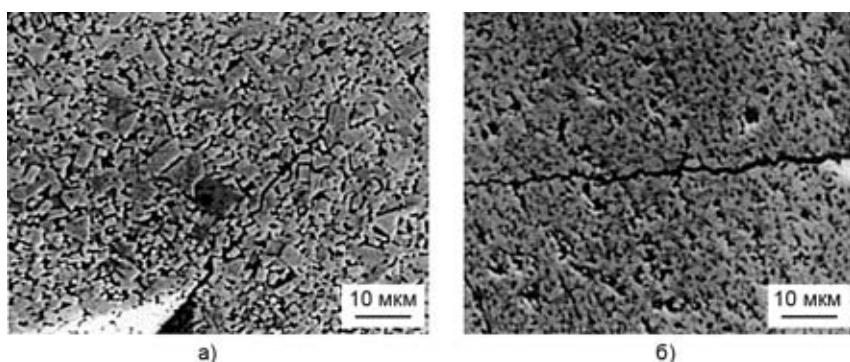


Рис. 5. Трещины Палмквиста, распространяющиеся от угла отпечатка индентора: а — WC—Co— Al_2O_{3f} ; б — WC (стандартный)

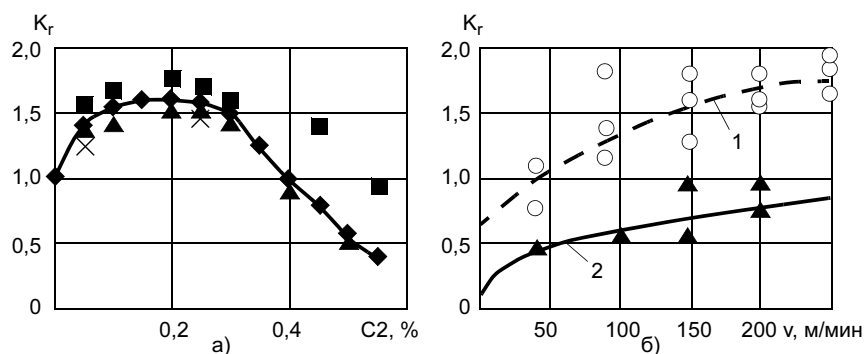


Рис. 6. Зависимость коэффициента относительной стойкости K_r от содержания нанопорошков C2 (а) и скорости резания v (б): 1 — WC—Co—0,25 % Al_2O_{3f} ; 2 — WC—Co

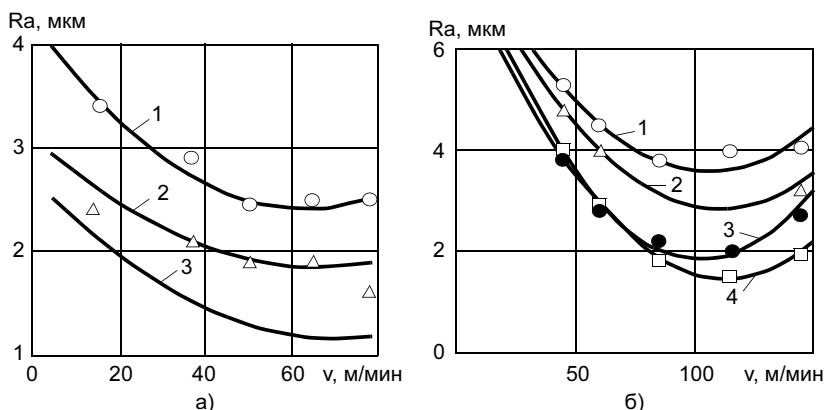


Рис. 7. Зависимость параметра шероховатости поверхности обрабатываемого материала Ra от скорости резания v : а — 1 — WC—TiC—Co; 2, 3 — WC—TiC—Co—0,25 % Al_2O_{3f} ; б — 1, 4 — WC—Co; 2, 3 — WC—Co—0,25 % Al_2O_{3f}

лении волок, вставок, матриц, оправок, ввертышей волоочильного и прессового инструмента. Результаты испытаний на Уральском новотрубном заводе и Красноярском металлургическом заводе свидетельствуют об увеличении стойкости инструмента от 1,5 до 2 раз.

Полученные в процессе эксплуатационных испытаний результаты позволяют рекомендовать модифицирование твердых сплавов нанопорошками для изготовления режущего инструмента с расширенной областью применения (в сторону повышенных скоростей резания) и обработки труднодеформируемых сплавов, а также изготовления инструмента, работающего в условиях износа по поверхности.

ВЫВОДЫ

1. Расчетными и экспериментальными методами определены оптимальные области добавок нанопорошков, разработаны составы и технологии изготовления твердосплавных композитов с повышенными прочностными и эксплуатационными характеристиками.

2. Экономическая эффективность использования нанопорошков для повышения качества твердых сплавов объясняется тем, что количество добавок составляет доли процента, технология изготовления модифицированных твердых сплавов практически не отличается от традиционной, применяемой для стандартных марок.

В то же время модифицирование позволяет повысить скорость резания (производительность), расширяет область применения, увеличивает коэффициент относительной стойкости и улучшает качество обрабатываемой поверхности по сравнению с твердыми сплавами базовых марок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nakamura M., Gurland J. The fracture toughness of WC—Co two-phase allous. A preliminary model // Metal Trans. A. 1980. Vol. 11. № 1. P. 141—146.
2. Чернявский К. С., Травушкин Г. Г. Современные представления о связи структуры и прочности твердых сплавов // Проблемы прочности. 1980. № 4. С. 11—19.

К. В. ШЕРЕМЕТЬЕВ, аспирант
МГТУ "Станкин"

Вспомогательный инструмент для технологической модернизации фрезерных станков

В настоящее время применяют большое количество вспомогательного инструмента, устанавливаемого в шпиндель станка, что позволяет провести модернизацию станка для решения конкретных технологических задач производства.

Ниже приведены примеры такого инструмента, его функциональная классификация по областям применения, основные положительные и возможные отрицательные аспекты, связанные с использованием инструмента.

Держатели с адаптерами для внутреннего подвода СОЖ

В операциях сверления применение охлаждающей жидкости является важным фактором успешной работы. Она предназначена для охлаждения, улучшения эвакуации стружки и создания защиты стенок отверстия от повреждения. Хорошие смазывающие свойства СОЖ помогают предотвратить образование нароста. Однако при использовании внешнего подвода СОЖ возможны проблемы с пакетированием стружки (сверление глубоких отверстий или неустойчивое стружкодробление) и перегревом (если СОЖ не попадает в зону резания), что может привести к потере размерной точности, износу или поломке инструмента. При обработке глубоких отверстий (глубиной более трех диаметров) и использовании внеш-

него подвода СОЖ необходимо применять цикл глубокого сверления для эвакуации стружки и очистки отверстия.

В зависимости от расположения шпинделя станка применяют два цикла глубокого сверления.

- Горизонтальный цикл — сверление с выводом. Периодический отвод сверла после сверления на глубину одного диаметра. При этом нельзя полностью выводить сверло из отверстия, что может привести к повреждению режущей кромки.
- Вертикальный цикл глубокого сверления — прерывистый цикл сверления с периодической остановкой подачи или небольшим отводом сверла на 0,3 мм от дна отверстия. При этом сверло должно продолжать вращаться. При использовании вертикального шпинделя этот метод позволяет избежать осыпания стружки на дно отверстия и повреждения режущих кромок.

Таким образом, использование внешнего подвода СОЖ связано с ограничениями по глубине сверления, обрабатываемым материалам, а также производительности. Для обеспечения хорошей эвакуации стружки и эффективного охлаждения непосредственно в зоне резания необходимо обеспечить внутренний подвод СОЖ через инструмент. Особенно это важно при сверлении коррозионно-стойких сталей, титана, жаропрочных сплавов, материалов,



Рис. 1. Специальная головка с адаптером

образующих длинную стружку, или при сверлении отверстий глубиной, превышающей три диаметра.

К сожалению, далеко не все станки на отечественных предприятиях имеют опцию подвода СОЖ через шпиндель. Для того чтобы качественно выполнять операции сверления, необязательно приобретать новый станок — можно использовать специальные головки с адаптерами (рис. 1.) Такой вспомогательный инструмент позволит использовать на старом станке внутренний подвод СОЖ, что всегда предпочтительнее при сверлении.

Ускорительные головки

Правильность выбора режимов резания существенно влияет на процесс обработки. Важно, чтобы скорость резания и подача для каждого типа инструмента назначались в соответствии с материалом заготовки и условиями обработки. Если с установкой требуемой подачи проблем не возникает, то обеспечить требуемую скорость резания для современного твердосплавного инструмента не всегда просто. Слишком низкая скорость резания влечет за собой не только потерю производительности, но также может стать причиной наростообразования, что снижает качество обработанной поверхности и часто приводит к выкрошиванию режущей кромки во время его срыва. При сверлении низкая скорость

резания является причиной износа по перемычке. Особенно актуален вопрос производительности при сверлении и обработке концевыми фрезами алюминиевых и магниевых сплавов, когда обороты шпинделя станка должны быть очень высокими.

Для примера в таблице приведены рекомендации по величине скорости резания фирмы Sandvik Coromant — одного из мировых лидеров по производству твердосплавного инструмента.

Как следует из таблицы, не каждый современный станок может обеспечить такое число оборотов на шпинделе. При выборе станка для обработки детали одним из основных факторов является максимальный крутящий момент на требуемой частоте вращения при торцевом фрезеровании, имеющемся в данной технологии на деталь, поэтому операции сверления и фрезерования концевыми фрезами имеют низкую производительность. В таких случаях можно применять ускорительные головки (мультипликаторы) (рис. 2, а) или сменные высокоскоростные моторшпиндельные головки (рис. 2, б).

Ускорительные головки представляют планетарный редуктор, который повышает скорость вращения инструмента до 12 раз. Большим достоинством мультипликатора является то, что он устанавливается в инструментальный магазин станка и шпиндель с помощью манипулятора и полностью автономен в работе. К минусам ускорительной головки можно отнести большее потребление мощности станка, чем это требует выполняемая операция (что необходимо учитывать при ее применении), а также ограничения по максимальной частоте вращения (20 000—25 000 об/мин) из-за сложной конструкции.

Сменные моторшпиндельные головки устанавливаются в невращающийся шпиндель станка и используют его несущую систему. Они позволяют увеличивать частоту вращения инструмента до 42 000 об/мин с мощностью от 1 до 10 кВт и крутящим моментом

Операция	Диаметр инструмента, мм	Скорость резания, об/мин, при обработке материалов	
		Алюминий, магний	Сталь 40Х
Сверление	5	12 892	4 584
	1	Свыше 50 000	17 825
Фрезерование паз	5	Свыше 50 000	9 167
	1	Свыше 50 000	Свыше 50 000

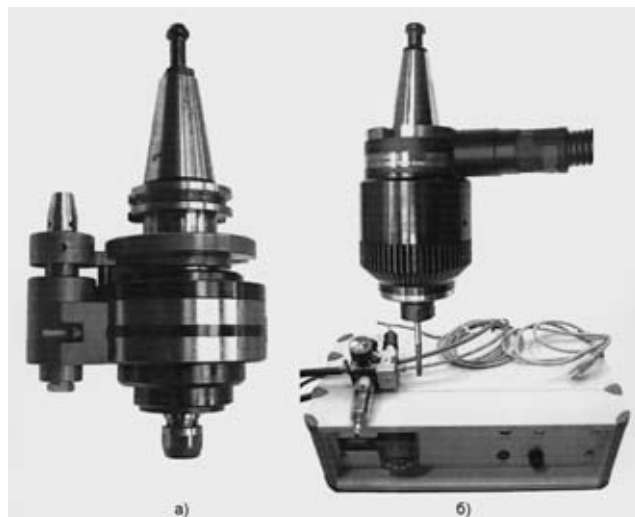


Рис. 2. Ускорительная головка (а) и сменная высокоскоростная моторшпиндельная головка (б)

от 0,2 до 5,6 Н · м. Однако моторшпиндельные головки нельзя устанавливать в инструментальный магазин — этому препятствуют подвод провода питания от преобразователя частоты и трубки от блока охлаждения (у маленьких моделей это поток воздуха, проходящий по ребрам корпуса, у более мощных моделей — водяное охлаждение). Применение такого вспомогательного инструмента значительно повышает производительность обработки мелких конструктивных элементов на крупных корпусных деталях.



Рис. 3. Сменные головки с фиксированным (а) и регулируемым (б) углами поворота



Рис. 4. Мультишпиндельная головка

Угловые головки

В производстве часто возникает необходимость обработки под углами, недоступными со стороны основного шпинделя, что связано с недостаточным числом управляемых координат станка. Эту задачу можно решить с помощью переустановки и закрепления заготовки под требуемым углом, что приводит к большой потере производительности и ухудшению размерной точности при обработке. Часто современные станки комплектуют устанавливаемыми на стол поворотными столами, управляемыми от встроенного УЧПУ, что позволяет изменять угол ориентации закрепленной детали в процессе обработки. Но такая дополнительная оснастка не всегда оправдана, например, при обработке крупногабаритных деталей гораздо удобнее изменять ориентацию и привод инструмента, что позволяют делать сменные головки с фиксированным (рис. 3, а) и регулируемым (рис. 3, б) углами поворота. Такая вспомогательная оснастка практически добавляет дополнительные степени свободы и обеспечивает возможность фрезерования, сверления, нарезания резьбы под углами, недоступными со стороны основного шпинделя.

Мультишпиндельные головки

В отраслях промышленности, где уровень конкуренции очень высок, производительность является одним из решающих факторов. В таких условиях возможность обрабатывать несколько поверхностей за один проход очень актуальна. Мультишпиндельные головки (рис. 4) обеспечивают возможность обработки несколькими инструментами одновременно, что существенно сокращает время обработки одной детали. Такие вспомогательные инструменты являются специальными и их изготавливают непосредственно под обработку одной конкретной детали. Поэтому их применение оправдано только в крупносерийном производстве.

Рассмотренные выше примеры вспомогательного инструмента, положительные стороны его использования и его многообразие демонстрируют интерес производителей к данному виду оснастки. Однако практика показывает, что подобная технологическая модернизация оборудования не всегда положительно сказывается на качестве обработки. Нельзя забывать, что, применяя сложный вспомогательный инструмент, мы добавляем в несущую систему станка еще один узел, который содержит стыки, подвижные элементы, обладает массой и собственной податливостью, что влияет на статические и динамические характеристики несущей системы станка, а следовательно, и на точность обработки. Возможность прогнозировать влияние вспомогательного инструмента на характеристики станка, и в первую очередь на его точность, обеспечит максимальную эффективность проводимой модернизации.

Ю. Г. НОВОСЕЛЬЦЕВ, Е. А. ЧЕРНЫХ, С. М. ТУФ

Политехнический институт Сибирского федерального университета (Красноярск)

Исследование условий для эффективной работы плазмы в сварочных процессах

Общим элементом устройств, предназначенных для генерирования стабилизированной дуги, является металлический "формирующий" цилиндр, внутри которого функционирует часть столба дуги (рис. 1). Его внутренний диаметр соизмерим с диаметром дуги. Благодаря этому при обдуве газом или при наложении внешнего магнитного поля дуга ограничена. Для обеспечения нормальной работы формирующего цилиндра в условиях больших тепловых нагрузок необходимо обеспечить максимальный теплоотвод от внутренней поверхности цилиндра к теплопроводящей среде. Поэтому цилиндр обычно выполняют из металлов с высокой теплопроводностью, в частности из меди и ее сплавов. Учитывая высокую электропроводность этих материалов, в первую очередь необходимо установить место сопла в электрической цепи дуги. В зависимости от потенциала, под ко-

торым находится формирующий цилиндр, изменяются условия горения дуги и ее параметры.

В системе (см. рис. 1) дуга горит между стержневым вольфрамовым катодом 1 и анодом 2, цилиндр находится под одним потенциалом с анодом. Положение анодной области полностью определяется газодинамическими характеристиками процесса, от длины канала анода по достижении ею достаточно большой величины положение анодной области и протяженность дуги не зависят. Это является основным недостатком. При использовании для стабилизации дуги инертных газов, в атмосфере которых стойкость электродов исключительно высока, при расходах, обычно применяемых на практике (до $3\text{--}5\text{ м}^3/\text{ч}$), не удается значительно увеличить протяженность и мощность дуги.

Данный недостаток может быть устранен при использовании дуг значительной длины, мощность которых возрастает вследствие снижения напряжения в ее столбе. Для получения более длинных дуг применяют системы, в которых электроды разделены межэлектродными вставками, находящимися под различными потенциалами по отношению к аноду [1].

Вывод о том, что возможно получение сколь угодно протяженных дуг и увеличение их мощности за счет простого увеличения расстояния между электродами, ошибочен. Однако экспериментальные данные показывают, что при растяжении дуги в электропроводном канале свыше определенного предела происходит шунтирование столба дуги корпусом сопла. На-

рушение газовой изоляции сопла и появление в нем электродных областей приводит к разрушению элементов дуговых головок.

Максимальная длина столба дуги в канале одного сопла определяется напряженностью поля в дуге. Увеличение длины формирующего сопла, снижение его диаметра, повышение напряженности поля в столбе дуги путем повышения тока либо добавкой газа с большей теплопроводностью могут привести к аварийному режиму.

Важным фактором, определяющим напряжение и мощность стабилизированной газовой дуги, является состав ее газовой атмосферы.

В табл. 1 приведены данные, полученные при исследовании стабилизированных газовой дуги.

Из анализа приведенных данных следует, что при горении дуги в водороде и гелии обеспечивается максимальная энтальпия газа наряду с повышением напряжения. Благодаря этому возрастает как общая мощность дуги, так и эффективность теплопередачи.

Отличительной характеристикой водородной и гелиевой дуг является более высокая напряженность поля в столбе по сравнению с дугами, горящими в атмосфере различных плазмообразующих газов. Так (рис. 2), напряженность поля дуги, горящей в водороде при давлении $9,806 \cdot 10^4\text{ Па}$ и малых токах, в 3—10 раз превосходит напряженность поля дуг, горящих в других, наиболее часто применяемых для стабилизации газом (Ar, N₂). Аналогичная зависимость сохраняется и при больших токах [2].

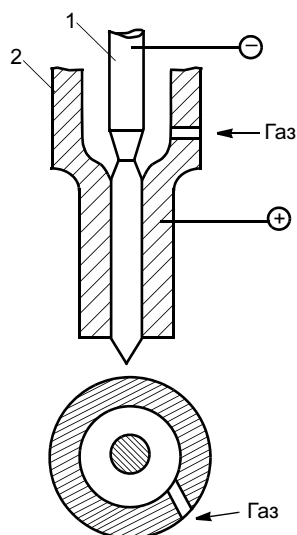


Рис. 1. Схема стабилизации дуги в канале формирующего цилиндра

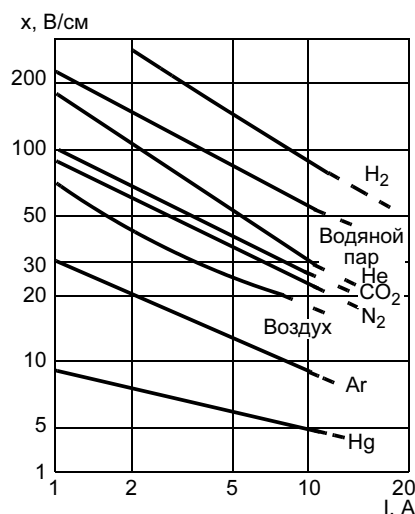


Рис. 2. Влияние состава газовой атмосферы дуги на напряженность поля в столбе дуги

Высокая напряженность поля в столбе дуги, горящей в водороде и гелии, объясняется большой теплопроводностью этих газов.

Так, теплопроводность H_2 , N_2 , He и Ar при $T = 273 \text{ К}$ и $p = 9,806 \cdot 10^4 \text{ Па}$ составляет $172 \cdot 10^{-3}$, $242 \cdot 10^{-4}$, $143 \cdot 10^{-3}$ и $165 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ соответственно.

При температуре, соответствующей наблюдаемой в столбе стабилизированной газовым потоком дуги, степень диссоциации водорода близка к единице. Области же температур, в которых происходит процесс диссоциации двухатомных газов, соответствует резкий скачок в кривой теплопроводности (рис. 3).

Повышение теплопроводности водорода связано с дополнительными потерями энергии на его диссоциацию, в результате резко возрастает удельное теплосодержание газа, проходящего через дугу. Повышается и эффективность нагрева обрабатываемых объектов, которым дополнительно пере-

дается энергия, затраченная на диссоциацию водорода.

Высокое теплосодержание гелия и водорода, прошедших через столб дуги, приводит к увеличению длины факела нагретого газа, расположенного за анодной областью. Благодаря этому возрастает время нахождения частиц порошка в нагретом газе при плазменно-порошковом напылении.

Более высокие значения мощности и оптимальные условия теплопередачи от факела к нагреваемому объекту позволяют при применении водородной и гелиевой дуг значительно повысить производительность процесса обработки изделий.

Применение гелия и его смесей с аргоном при сварке неплавящимся электродом позволяет увеличить толщину свариваемых металлов.

Однако использование водорода или гелия сопряжено с трудностями защиты сопла плазмотрона и электродов от разрушения. Исследования показали практическую невозможность обеспечить длительное стабильное горение водородной дуги из-за интенсивного разрушения медного анода уже при малых мощностях. Разрушение анода, хотя и менее интенсивное, происходит и при горении в атмосфере чистого гелия.

Установлено, что обеспечить стабильное горение сильноточной водородной дуги при достаточно высокой стойкости электродов возможно путем введения в состав дуги газов с более высокой молекулярной массой. Количественные данные о влиянии состава газовой атмосферы дуги на стойкость цилиндрического анода приведены в табл. 2.

При стабилизации аргонородной дуги износ медного анода всего лишь в 2 раза больше,

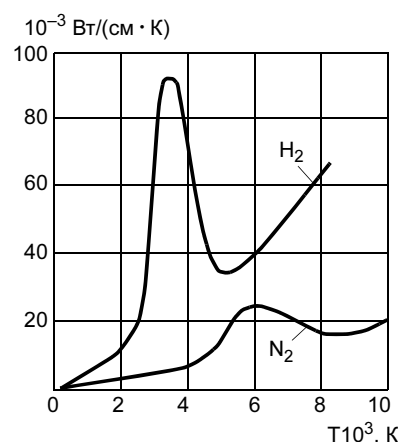


Рис. 3. Зависимость теплопроводности двухатомных газов от температуры

чем в случае стабилизации аргонноазотной смесью, инертной по отношению к меди, и меньше, чем при использовании аргонородной смеси [3].

Обычно в качестве второго компонента водородсодержащей газовой смеси применяют аргон или азот, которые имеют значительно большую, чем водород, молекулярную массу и химически инертны по отношению к материалу электродов в широком диапазоне температур.

Переход от однокомпонентной водородной к двухкомпонентной водородсодержащей дуге целесообразен в том случае, если наряду с повышением стойкости электродов дуговой горелки не произойдет ухудшение энергетических характеристик.

Исследования сварочной аргонородной дуги, диаметр столба которой не ограничен внешними условиями, показали, что ее поведение и параметры не зависят существенно от состава газовой смеси и определяются расходом водорода. Расход аргона влияет лишь на устойчивость горения дуги, возрастающую с его увеличением.

Таблица 1

Газ	Мощность, подводимая к горелке, кВт	Температура плазмы, °С	Энтальпия плазмы, Дж/кг	Напряжение дуги, В	Эффективность нагрева газа, %
Ar	48	14 500	$22\,186 \cdot 10^3$	40	40
He	50	20 000	$24\,279 \cdot 10^4$	47	48
N_2	60	7 200	$47\,302 \cdot 10^3$	65	60
H_2	62	5 000	$33\,069 \cdot 10^4$	120	80

Таблица 2

Ar, %	Ток дуги, А	Напряжение дуги, В	Расход газа (суммарный), м³/ч	Износ медного сопла, г/(кВт · ч)
100	200	42	3,4	0,005
50	200	100	5,5	0,1
50	230	90	4,7	0,05
50	220	85	3,8	0,4

Теоретические исследования указывают на возможность разделения двухкомпонентных газовых смесей в присутствии силовых полей. Этот случай описывается уравнением [4]:

$$\vec{n}_1 = -\frac{M_1}{M_2} \rho D_{12} \left[\text{grad } n_1 / n + \sum_{i=1}^k K_{Fi} \vec{F}_i \right], \quad (1)$$

где $\vec{n}_1$ — вектор скорости одного из компонентов газовой смеси; n_1 , n — соответственно концентрация одного из компонентов и газовой смеси в целом; M_1 , M_2 — молекулярная масса каждого из компонентов; ρ — плотность газовой смеси; D_{12} — коэффициент диффузии; $\vec{F}_i$ — вектор силы внешнего силового поля; K_F — коэффициент пропорциональности, зависящий от природы силового поля.

Действие термодиффузии приводит к тому, что более тяжелый газ смещается в более холодные области столба дуги.

В случае чисто водородной дуги, горящей в камере большого объема, вторым компонентом газовой смеси служит недиссоциированный водород. Так, разрушения электродов удастся избежать благодаря наличию теплоизолирующего слоя холодного газа у стенок каме-

ры и анода. Этот слой образуется при вихревой (тангенциальной) подаче в дугу большого количества водорода (10—60 м³/ч), т. е. под действием внешних силовых полей.

Наблюдающееся в ряде случаев разрушение анода водородсодержащей стабилизированной дуги, предназначенной для нагрева порошкообразных материалов, является тепловым. Следовательно, стойкость анода может быть повышена либо при снижении теплового потока, либо при его равномерном распределении на большой поверхности. Первый путь связан с подачей в дугу большого количества тяжелого газа (аргона, азота), второй — с принудительным перемещением анодной области, а вместе с ней и столба дуги в канале анода с достаточно большой скоростью.

Стойкость анода и стабильность горения дуги значительно выше при вихревой (тангенциальной) подаче газовой смеси, чем при газовой стабилизации дуги с аксиальной подачей.

ВЫВОДЫ

1. При горении дуги в водороде и гелии обеспечивается максимальная энтальпия газа наряду с повышением напряжения дуги. Благодаря этому возрастает как ее общая мощность, так и эффек-

тивность теплопередачи от нее к нагреваемым объектам.

2. При температурах, соответствующих наблюдаемым в столбе стабилизированной газовой потоком дуги, степень диссоциации водорода близка к единице.

3. Введение водорода в состав газовой атмосферы, стабилизированной газовой потоком дуги при плазменной резке металлов, позволяет в десятки раз увеличить скорость резки и значительно расширить диапазон толщин разрезаемых металлов.

4. Применение гелия и его смесей с аргонem при сварке неплавящимся электродом позволяет увеличить мощность дуги.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новосельцев Ю. Г., Мушенко А. В., Красовитова Е. А. Особенности исследования стабилизированных плазменных дуг // Вестник ПИ СФУ. Красноярск, 2007. С. 60—65.
2. Гарин Е. Н. Методика исследования плазменной дуги // Вестник Красноярского ГТУ. 2005. Вып. 38.
3. Новосельцев Ю. Г., Ли И. В. Особенности работы плазмотронов в бинарных плазмообразующих смесях // Технология машиностроения. 2006. № 9. С. 53—57.
4. Новосельцев Ю. Г., Холодов Д. А. Проблемы изготовления крупногабаритных изложниц кристаллизаторов из меди и ее сплавов для вакуумной и электрошлаковой выплавки титановых слитков // Вестник КГТУ. 2004. С. 128—132.

В. Н. ПЕТЕЦКИЙ, Н. В. ПЕТЕЦКИЙ

Фазовая динамика в условиях сварки с ограниченным количеством шлака конструкций ответственного назначения

Работоспособность конструкций ответственного назначения во многом определяется составом используемых материалов, механизмом взаимодействия сред в условиях реальных технологических процессов. Такие конструкции выполняются из высокопрочных и коррозионно-стойких сталей, титановых и алюминиевых сплавов. Аппараты, емкости и трубопроводы для про-

изводства и хранения сжиженных газов, аэрозолей, бензина функционируют в широком диапазоне температур при экстремальных ситуациях, высоких давлениях, коррозионной среде. Агрегаты и аппараты, суда и буровые платформы, работающие при низких температурах севера нашей страны, на материке и в акватории моря, выполняют из высокопрочных ма-

териалов с высокими показателями ударной вязкости. Существует зависимость вязкости при надрезе наплавленного металла от характера теплоотвода. Односторонняя сварка высокопрочных материалов за один проход часто нецелесообразна по причине появления участков пониженной пластичности.

Высокопрочные стали сложной системы легирования с термиче-

ским упрочнением имеют мелкозернистую структуру и весьма чувствительны к термическому циклу сварки. Они не допускают перегрева и колебаний режимов, значительной микрон неоднородности, увеличения хрупкости.

Представляют опасность шлаковые включения, поры и водородное охрупчивание, вероятность которого возрастает с повышением прочности стали, особенно мартенситного и бейнитного классов. Наиболее чувствительна к водородному охрупчиванию зона термического влияния, размеры которой стараются ограничить, например применением тонких проволок высокого качества. Для материалов, весьма чувствительных к хрупким разрушениям, необходимы технологические приемы, обеспечивающие снижение погонной энергии и объемов расплавленного металла, количества примесей и содержания водорода, измельчение структуры.

В технологии производства ответственных сварных конструкций предпочтителен переход на многопроходные швы и низководородные сварочные материалы, применение которых обеспечивает автоматизацию и роботизацию ряда сложных операций. К таким сварочным материалам, в частности, относится бесшовная порошковая проволока (БПП), анализу особенностей свойств которой посвящена данная работа.

При производстве такой проволоки заполняют трубчатые длинномерные заготовки шихтой требуемого состава методом направленной вибрации с последующим волочением и применением отжига для снятия напряжений и удаления водорода [1]. По такой схеме возможно изготовление проволоки для прецизионных технологий. При этом обеспечивается ее достаточная жесткость, что исключает создание специальных условий хранения и применение механизмов подачи, традиционных для обычной порошковой проволоки с оболочкой из ленты.

Содержание шлаковой фазы, в значительной степени влияющей на металлургические процессы диффузии водорода в металле швов и ударную вязкость, при использовании БПП находится на уровне 5—7 %, что существенно ниже по сравнению с другими материалами. Это требует значительной активности элементов, учета кинетики и динамики их взаимодействия в реакционной зоне. Известно, что с уменьшением диаметра проволоки повышается степень концентрации энергии в столбе дуги и глубина проплавления, изменяется вид переноса жидкого металла и уменьшается критический ток.

Малые диаметры проволоки приводят к некоторому сжатию дугового разряда и ограничению размеров активных пятен. Это уменьшает передачу теплоты капле, снижая ее теплосодержание.

При увеличении коэффициента заполнения проволоки и содержания шлаковой составляющей повышаются затраты энергии на ее расплавление, а при повышении доли металлической части в сердечнике (>30 %) возможно шунтирование электрического тока и, соответственно, снижение температуры каплей. Распределение температуры по высоте капли на торце проволоки носит сложный характер и зависит от теплоемкости и теплосодержания, участвующих в расплавлении фаз. Температура каплей зависит от количества шлака, что связано с повышенным расходом теплоты на его расплавление (теплоемкость шлака рутилового типа около 0,96 кДж/(кг · К), теплосодержание шлака 1800—2200 кДж/кг, что значительно выше теплосодержания металла).

Увеличение температуры проволоки приводит к снижению теплосодержания каплей. Температуру торца проволоки ориентировочно можно определить по формуле

$$T = 0,164j^2t - 670,$$

где j — плотность тока; $t = H/v_{\text{под}}$ (H — вылет, $v_{\text{под}}$ — скорость подачи проволоки).

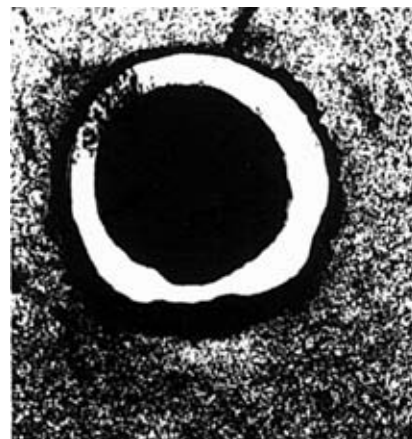


Рис. 1. Шлиф капли металла, оторвавшейся от электродной проволоки (×15)

Исследовали равномерность покрытия капли шлаком. Установлено, что капля при сварке БПП равномерно покрыта слоем шлака незначительной толщины (рис. 1). Справедливо допущение, что температура тонкой пленки шлака примерно равна температуре капли. Она возрастает с ростом плотности тока, что особо заметно на проволоках малых диаметров. Экспериментальные данные и предварительные расчеты показывают высокую степень разделения металла и шлака на стадии капли при условии оптимального сочетания гранулометрического состава шихтовых компонентов и режимов сварки. Поверхностное натяжение

$$P_{\text{п.н}} = 2\pi\sigma \frac{r^2}{R},$$

где σ — межфазное натяжение на границе шлак—металл; r — радиус электродной проволоки; R — радиус кривизны поверхности капли.

Следует отметить, что условия существования капли на торце электродной проволоки и проходящей через дуговой промежуток различны. Для капель, проходящих через дуговой промежуток, удельная поверхность, реагирующая со шлаком,

$$\sigma_k = \frac{F_k}{m_k},$$

где F_k , m_k — площадь поверхности и масса капли.

Масса капли

$$m_k = k \frac{\pi d^3}{4} \rho,$$

где k — коэффициент пропорциональности; d — диаметр; ρ — плотность.

Если капля имеет форму полусферы, то удельная поверхность

$$\sigma_k = \frac{1,05 \cdot 10^{-2}}{\sqrt[3]{m_{cp}}},$$

где m_{cp} — средняя масса капель.

Средняя масса капель на тонких проволоках меньше, а скорость подачи проволоки выше и, соответственно, меньше время взаимодействия капли, переходящей дуговой промежуток со средой:

$$\tau_k = \frac{m_{cp}}{v_{пл}},$$

где $v_{пл}$ — средняя скорость плавления.

Интенсивность реакций, обусловленных в основном кинетическими факторами, можно оценить коэффициентом

$$C = \frac{S t_{ж}}{P},$$

где $S = \int_0^{t_k} [S_0 - S(t)] dt + S_k t_{п}$; $t_{ж} = t_k + t_{п}$,
 $P = \gamma_{ж} V_{э} t_k$.

В формулах S , S_0 , S_k , $S(t)$ — действующая поверхность капли, поверхность капли на электроде, поверхность переходящей и растущей капли соответственно; $t_{ж}$, t_k , $t_{п}$ — время жизни капли, роста и



Рис. 2. Внешний вид капли электродного металла, сформировавшейся на торце проволоки ($\times 15$)

перехода с электрода в ванну соответственно; $V_{э}$ — объем расплавленного электрода; $\gamma_{ж}$ — удельная плотность жидкого металла.

Исследовали влияние гранулометрического состава и диаметра проволоки на размеры капель и завершенность разделения фаз путем определения их состава и уровня микронеоднородности.

Сварку выполняли проволоками диаметром от 1,2 до 2,4 мм с грануляцией порошков от $\frac{-01}{+007}$

до $\frac{-02}{+016}$ мм.

Для исследования отбирали капли на торце проволоки (рис. 2) и сразу после обрыва на короткой дуге. Капли на торце проволоки в основном пустотелые, что увеличивает площадь их поверхности. Они покрыты шлаком толщиной

от 0,07 до 0,5 мм. Металлографические исследования показали практически полное отсутствие в металлической фазе капель шлаковых включений, что свидетельствует о достаточно глубокой стадии разделения, хотя равновесное состояние на этом этапе вряд ли достижимо.

С помощью микроанализатора изучали характерную плоскость в разрезе капли, удаленную от границы поверхности со стороны дугового разряда на расстояние 0,3—0,5 мм. Микрорентгеноспектральный анализ (рис. 3) выявил высокий уровень завершенности процессов разделения фаз и однородный характер распределения легирующих элементов в капле с разбросом от 0,12 до 0,16 %, что по сравнению с покрытыми электродами, где разброс обычно на уровне $\pm 0,9$ %, свидетельствует о высокой активности тонкого слоя шлака. Увеличение грануляции металлической составляющей шихты приводит к некоторому снижению уровня легирования на стадии капли, уменьшая степень завершенности процесса разделения "шлак—металл".

Разные взаимодействия в реакционной зоне приводят к изменению действия реактивных сил, что меняет характер и вид переноса жидкостного металла в дуге.

Качество сварных швов во многом зависит от состава газовой фазы. При сварке порошковой проволокой, изготовленной из ленты, га-

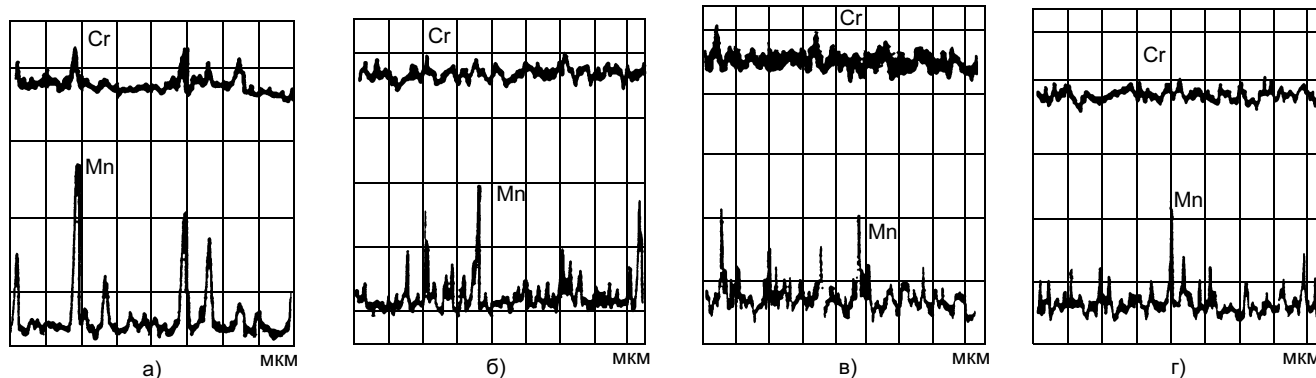


Рис. 3. Диаграммы распределения концентрации элементов по сечению капли при диаметре проволоки и грануляции порошков 1,75 и $\frac{-02}{+016}$ мм (а), 2,4 и $\frac{-02}{+016}$ мм (б), 2,4 и $\frac{-01}{+007}$ мм (в) и 2,0 и $\frac{-01}{+007}$ мм (г)

зовая фаза содержит значительное количество водорода и паров воды.

Насыщение жидкого металла газами происходит на многих стадиях сварочного процесса. Особая роль принадлежит стадии формирования капли в зоне высокой температуры, где реакционные поверхности больше и максимален градиент концентрации элементов [2].

Растворимость водорода в металле выражается уравнением

$$[H] = K \sqrt{p_{H_2}},$$

где $[H]$ — равновесное содержание водорода в жидком металле; K — константа растворимости; p_{H_2} — парциальное давление молекулярного водорода в газовой фазе.

При наличии атомарного и молекулярного водорода равновесная концентрация

$$[H] = K \sqrt{p_{H/H_2}^{1+\alpha}},$$

где p_{H_2} , p_H — парциальное давление молекулярного и атомарного водорода; α — степень диссоциации водорода при определенной температуре.

При температуре дуги около 5000 К степень диссоциации молекулы водорода достигает 0,95.

Для водорода $2H \leftrightarrow H_2 + 103,8$ ккал/моль константа равновесия процесса диссоциации при

постоянном давлении $K_p = \frac{p_H^2}{p_{H_2}}$,

а с учетом температуры

$$\begin{aligned} \lg K_{p_{(H_2)}} &= \\ &= \frac{22570}{T} - 1,504 \lg T - 0,767. \end{aligned}$$

Наличие водяного пара также влияет на содержание водорода:

$$[H] = K \frac{p_{H_2}^{1/2} p_{H_2O}}{p_{H_2O}},$$

где p_{H_2O} — парциальное давление водяного пара.

Количественная связь между наличием (адсорбцией) влаги и воз-

никновением пористости носит приближенный характер, поэтому ограничение влажности материалов и проведение их прокалки остаются важными требованиями для большинства сварочных материалов.

Растворимость газов в жидком металле и шлаках различна и усиливается при малом количестве шлака. Уменьшение объемов его реагирования должно компенсироваться повышением активности составляющих шлака.

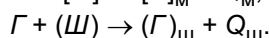
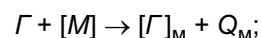
Для сварочных электродов с увеличением толщины слоя покрытия, а значит, и количества шлаковой части концентрация водорода в наплавленном металле возрастает. Например, для электродов АНО-4 при коэффициенте массы покрытия 30 % концентрация водорода $[H]_g = 20$ см³/100 г. При сварке порошковой проволокой, изготовленной из ленты, содержание водорода в наплавленном металле определяется его наличием в самой проволоке. Металлургические приемы снижения содержания водорода весьма ограничены. Влажность компонентов значительно влияет на содержание водорода в металле из-за высокого уровня его парциального давления и наличия водяного пара, растворенного в шлаке.

Зависимость количества растворяющегося газа от температуры

$$[C]_r = A e^{-\frac{E}{2RT}},$$

где A , R — постоянные; E — теплота растворения.

В двухкомпонентной системе шлак—металл ($Ш$ — $М$) процесс растворения газа можно описать без учета взаимного влияния компонентов на растворимость газа в расплаве:



Константы реакций растворения:

$$K_M e^{Q_M/RT} = \frac{[Г]_M}{Г[M]};$$

$$K_Ш e^{Q_Ш/RT} = \frac{[Г]_Ш}{Г[Ш]}.$$

Здесь $[M]$, $(Ш)$ — концентрация компонентов в металле и шлаке; $Г$ — концентрация газа; Q — теплота растворения газа в металле и шлаке.

Химическое поглощение газов на стадии полый капли интенсифицируется на ее развитой поверхности, полностью расположенной в реакционной зоне. Перегрев увеличивает растворимость газов, а незначительное поверхностное натяжение и интенсивное перемешивание способствуют их выделению. Растворимость водорода в фазовом переходе скачкообразно изменяется. Насыщение будет зависеть от способности шлака защищать металл.

Кроме того, в электрическом разряде наблюдается электрическое поглощение газа вблизи катода, при котором важнейшую роль играет сродство элемента электрону. Чем большим сродством обладает элемент, тем меньше будет содержание газа в жидком металле.

В условиях физико-химических взаимодействий ионам различных газов сообщается большая кинетическая энергия в электрическом поле высокой напряженности от 10^4 до 10^6 В/см. Заметно влияние поля на константу равновесия реакции:

$$\ln K = \ln K_0 + \frac{E \Delta M g}{RT},$$

где K_0 — константа вне действия электрического поля; E — напряженность электрического поля; $\Delta M g$ — изменение дипольного момента молекулы.

Отрицательные ионы F^- , Cl^- блокируют поверхность расплавленного металла в условиях обратной полярности, повышая энергию активации и препятствуя проникновению газов. Энергия активации определяет константу скорости реакций:

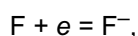
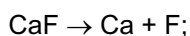
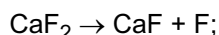
$$K = C e^{-E_a/RT},$$

где C — коэффициент пропорциональности; E_a — энергия активации.

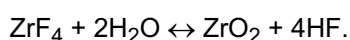
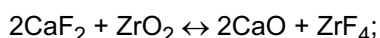
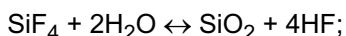
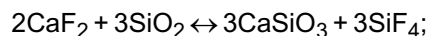
При ограниченном количестве шлака энергия активации играет важную роль в создании энергетического барьера проникновению газов в металл. Растворимость газов в жидком металле и шлаке, естественно, различается. В частности, фтор, обладая значительным сродством электрону ($F = 332,7$ кДж/моль), уменьшает концентрацию газов в жидком металле.

Положительное действие фторидов также объясняется эффективным связыванием водорода в химически стойкие соединения.

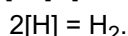
Для бесшовной порошковой проволоки основным поставщиком фтора в зону дуги является плавиковый шпат ($T_{пл} = 1673$ К, $T_{кип} = 2773$ К). Реакции диссоциации фтора:



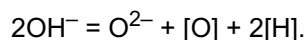
при содействии диоксида кремния:



В период кристаллизации возможно протекание реакций с образованием продуктов, не растворимых в металле:



Преодоление границы шлак—металл водородом сопровождается разрывом связи O—H:



Водород имеет низкий потенциал диссоциации и высокую теплопроводность. Это может приводить к охрупчиванию металла и появлению в нем газовых пузырьков, что реализуется при условии большего давления в пузырьке газа по сравнению с наружным давлением и небольшим

металлостатическом и шлакостатическом давлении в целом. Рост пузырька определяется его размерами, величиной поверхностного натяжения на границе газ—металл—шлак. Процесс развития чаще протекает на поверхности твердой фазы, находящейся в контакте с жидким металлом:

$$p_{\text{газ}} \geq p_{\text{атм}} + \frac{2\sigma}{r},$$

где σ — поверхностное натяжение; r — радиус газового пузырька.

Компонентная основа сварочных шлаков помимо фтористых соединений может содержать оксиды. Широко применяется система CaF_2 — CaO — SiO_2 , реже — CaF_2 — CaO — Al_2O_3 — SiO_2 — TiO_2 — ZrO_2 . Такие шлаковые композиции наиболее применимы при сварке ответственных конструкций. Тугоплавкие оксиды Al_2O_3 и SiO_2 имеют повышенную вязкость, слабо коагулируют, обладают небольшой скоростью всплывания. Но они практически нерастворимы в металле и при наличии определенных условий могут легко удаляться.

Мелкодисперсные оксиды Al_2O_3 , TiO_2 , ZrO_2 равномерно распределяются в металле и служат дополнительными центрами кристаллизации, измельчающими структуру легированных сталей. Их шлаковые включения имеют разную форму и размеры, крупные могут снижать выносливость металла (рис. 4).

В системе оксидных шлаков водород может оказывать раскисляющее действие. Константа реакции с закисью железа

$$K = \frac{[\text{H}_2\text{O}][\text{Fe}]}{[\text{FeO}][\text{H}_2]} \text{ или } K = \frac{p_{\text{H}_2\text{O}}}{[\text{FeO}]p_{\text{H}_2}}.$$

Несвязанный водород частично остается в металле (остаточный), другая часть диффундирует в реакционные зоны (диффузионно-подвижный водород). Распределение водорода в металле описывается физическими и математическими моделями в условиях прерывистой кристаллизации. На участке концентрационного уплотнения у границ раздела фаз содержание водорода существенно превышает его равновесную растворимость, определяя условие зарождения пор и микротрещин.

Известно, что основность шлака увеличивает водопроницаемость. Однако применение в составе шихты карбонатов, повышающих парциальное давление диоксида углерода в атмосфере дуги, снижает давление водорода и паров воды. Добавки кремния существенно влияют на скорость десорбции газов из металла, тормозя выделение водорода.

Основной шлак пригоден для сварки во всех пространственных положениях. Для основных шлаковых систем повышенная раскисленность металла требует ограничений по влажности шлакообразующей части сердечника проволоки. Кислые шлаки растворяют меньше водорода, чем основные. Для порошковых проволок в отличие от электродов не требуются пластификаторы, а БПП вследствие прокалики при высоких температурах практически не содержит водородсодержащих веществ.

Присутствие во многих шлаках кислородсодержащих ингредиентов ограничивает концентрацию водорода в металле, а также изменяет поверхностное натяжение жидкого металла. Если поверхно-

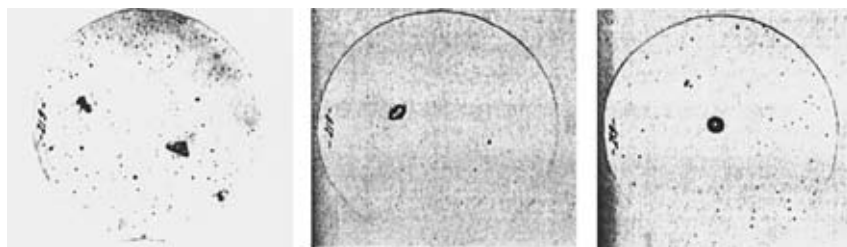


Рис. 4. Шлаковые включения в металле швов высокопрочных сталей, выполненных проволоками различных составов

стное натяжение металла около 1500 мДж/м^2 при температуре 1800 К , то на границе с окислительными шлаками оно находится на уровне $400\text{—}800 \text{ мДж/м}^2$. Водород незначительно влияет на поверхностное натяжение жидкого металла. По мере роста жидкой капли поверхностное натяжение увеличивается до предела, когда она приобретает форму полусферы. Сила поверхностного натяжения определяет количество движения капли:

$$M_k v_k = \int_{t_1}^{t_2} F_{\text{эд}}(t) dt - \int_{t_1}^{t_3} F_{\text{пн}}(t) dt,$$

где M_k — масса капли; v_k — скорость в момент обрыва капли; $F_{\text{эд}}$ — электродинамическая сила; $F_{\text{пн}}$ — сила поверхностного натяжения.

Взаимодействие в промежуточных зонах во многом определяется соотношением межфазного натяжения на границах твердого металла с жидким, металла с газом, жидкости с газом. Преобладание того или иного варианта смачивания (шлак смачивает металл лучше, чем газ, или же газ смачивает металл лучше, чем жидкость) приводит к образованию активного защитного шлакового слоя или активному проникновению газа в металл. Целесообразно не допускать пересыщения жидкого металла газом.

Поскольку капли на торце бесшовной порошковой проволоки имеют большую удельную поверхность, скорости растворения в них и удаления водорода большие. При наличии в сердечнике фторообразующих компонентов процессы удаления водорода идут весьма интенсивно.

Режимы сварки также влияют на процессы водородопроницаемости в металл через пленку шлака. Увеличение плотности тока повышает температуру капли и шлака, снижает поверхностное натяжение и вязкость.

Вязкость шлака определяет устойчивость горения дуги и динамику переноса металла. "Короткие"

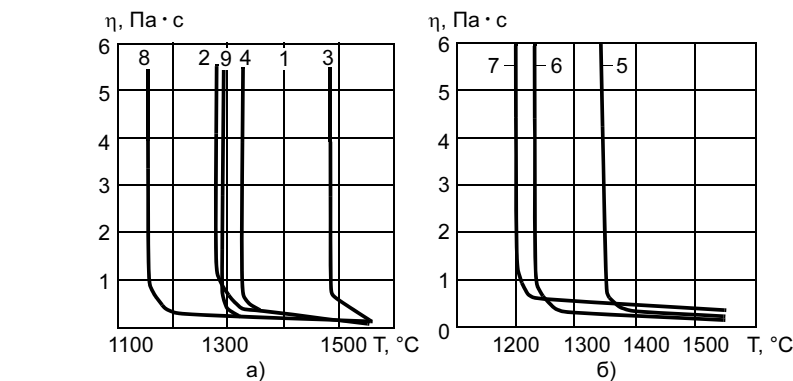


Рис. 5. Зависимость вязкости шлака η от температуры: а — система $\text{TiO}_2\text{—CaF}_2\text{—ZrO}_2\text{—Al}_2\text{O}_3$; б — система $\text{CaF}_2\text{—Al}_2\text{O}_3\text{—CaO—NaF}$

и жидкотекучие шлаки (большая скорость внутренних перемещений атомов), хорошо растекаясь, обеспечивают возможность работы на короткой дуге, хорошее повторное возбуждение и стабильный процесс горения. При этом при сварке по тонкому шлаку не наблюдается шунтирования дуги.

Из газа через шлак водород попадает в металл в результате диффузии или конвекции.

Количество растворившегося в шлаке водорода

$$\text{ОН}^- = K'_{\text{H}_2\text{O}} \sqrt{p_{\text{H}_2\text{O}}},$$

где $K'_{\text{H}_2\text{O}}$ — константа растворимости, являющаяся функцией состава шлака.

Коэффициент диффузии водорода в шлаке составляет около $2 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$. Проницаемость шла-

ка водородом во многом зависит от вязкости шлака.

Для приблизительной оценки влияния температуры и состава шлаковой части порошковой проволоки на вязкость шлака проводили серию экспериментов.

Из результатов экспериментов (рис. 5) следует, что при сварке формируются "короткие" шлаки, позволяющие вести сварку в различных пространственных положениях. Также шлаки обладают хорошей жидкотекучестью при высоких температурах, быстро покрывают расплавленный металл пленкой и хорошо пропускают газы.

Для порошковых проволок рутило-органического типа, изготовленных из ленты, характерно высокое содержание водорода в наплавленном металле ($14\text{—}28 \text{ см}^3/100 \text{ г}$),

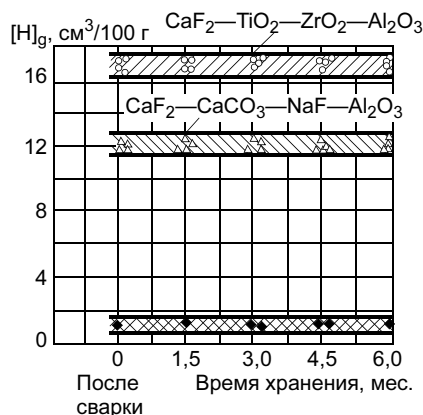


Рис. 6. Влияние состава, термической обработки и длительности хранения БПП на содержание диффузионного водорода в наплавленном металле (вакуумный метод) (○, △ — без термической обработки, ◆ — после нее)

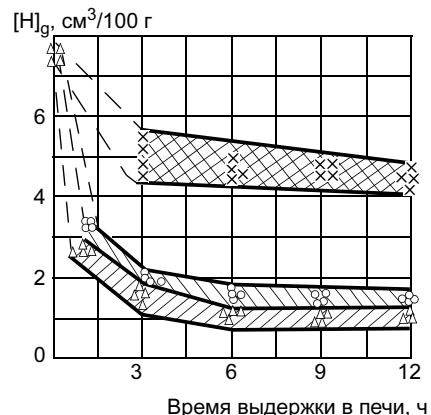


Рис. 7. Влияние режима термической обработки проволоки на содержание водорода в наплавленном металле (вакуумный метод) (x, □, △ — 350, 550 и 700 °С соответственно)

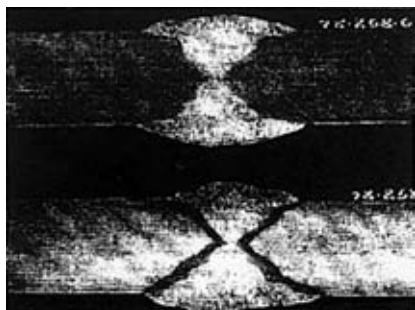


Рис. 8. Макрошлиф многослойного шва, выполненного бесшовной порошковой проволокой

что определяется спецификой ее производства.

В случае БПП этот недостаток устраняется. Количество диффузионно-подвижного водорода определяли вакуумным методом по схеме, приведенной в работе [3], позволяющей обеспечить высокую скорость охлаждения образца при его малой удельной поверхности.

Результаты экспериментов (рис. 6, 7) показывают, что вследствие малых поверхностных натяжений, быстрого разделения фаз,

металлургической обработки металла жидкотекучими шлаками, малых объемов и высокой активности происходит резкое понижение содержания в металле диффузионно-подвижного водорода, являющегося основной причиной образования дефектов при сварке высокопрочных сталей и титановых сплавов.

Комплекс проведенных исследований позволил оптимизировать технологический процесс сварки и получить качественные многослойные швы на высокопрочных сталях (рис. 8).

ВЫВОДЫ

1. Бесшовная порошковая проволока в силу особенностей производства и состава может быть отнесена к классу низководородистых сварочных материалов, применяемых при сварке конструкций ответственного назначения.

2. Фтористые соединения способствуют разжижению шлаков, уменьшают вязкость и, помимо

снижения парциального давления водорода в столбе дуги, значительно влияют на фазовое взаимодействие на границах активных сред.

3. Короткие жидкотекучие шлаки способствуют активному фазовому взаимодействию в реакционной зоне. Малое количество в наплавленном металле водорода, шлаковых включений свидетельствует о высоком качестве сварного шва.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петецкий В. Н., Петров Г. А., Демянцевич В. П. Бесшовные порошковые проволоки и особенности их изготовления // Сварочное производство. 1982. № 11.
2. Походня И. К. Металлургия дуговой сварки. Киев: Наукова думка, 2004. 440 с.
3. Левченко А. М. Вакуумный метод определения диффузионно-подвижного водорода применительно к ручной дуговой сварке покрытыми электродами. Л.: ЛПИ, 1974. Вып. 336. С. 3—7.

А. А. МИХЕЕВ, д-р техн. наук

(Сибирский федеральный университет),

С. В. ПРОКОПЬЕВ, канд. техн. наук

(Сибирский государственный аэрокосмический университет им. акад. Н. Ф. Решетнева)

Влияние защитной среды на стехиометрический состав пьезокерамики при диффузионной сварке

Для защиты свариваемых металлов от окисления и насыщения азотом и водородом из окружающей атмосферы в процессе нагрева и сварки используют разнообразные защитные среды, состав которых зависит не только от химической активности материала заготовок, но и от экономичности и технологичности их использования.

Вакуум — наилучшая по чистоте защитная среда [1], однако в тех случаях, когда необходимо сваривать сплавы, содержащие легко сублимирующие компоненты (латунь, бронзу, магниевые сплавы и т. д.), применение вакуума нежелательно. Испаряющиеся в вакууме компоненты сплавов приводят в негодность вакуумную систему, одновременно изменяется состав свариваемого материала. В связи с этим в ка-

честве защитных средств широко применяют нейтральные (аргон, гелий, азот и их смеси) и активные (водород, углеводороды, реже углекислый газ) газы, а также их смеси с инертными газами. Состав защитного газа подбирается исходя, в первую очередь, из химической активности системы металл—газ в условиях сварки.

Сварку пьезокерамики с металлами проводят преимущественно в вакууме¹ [2]. В работе [3] методом спектрального анализа как компактного материала, так и измельченных порошков исследовали изменения стехиометрического состава пьезокерамики в процессе диффузионной сварки в вакууме. Таблет-

¹ А. с. 1139598, 453199 (СССР).

ки из пьезокерамики и порошок подвергали часовой выдержке в вакуумной камере при различных температурах. Как показали исследования, наиболее чувствительной к изменению стехиометрии является пьезокерамика, измельченная в порошок (рис. 1). Наиболее интенсивно начинает сублимировать свинец при температуре выше 1073 К, поэтому температуру сварки следует выбирать с учетом возможного изменения стехиометрии пьезокерамики, чтобы максимально сократить возможные потери летучих компонентов пьезокерамики и тем самым сохранить необходимые пьезоэлектрические характеристики. В компактной пьезокерамике также обнаружено некоторое изменение содержания свинца, но оно менее заметно и порой находится в пределах чувствительности опыта. Опасаться изменения стехиометрического состава компактных образцов при температуре до 1000 К не следует, поскольку торцовые поверхности деталей закрыты металлическими электродами и сублимация возможна лишь с боковых поверхностей и, как правило, она невелика.

Однако [4] при сварке пьезокерамических узлов с большей боковой поверхностью по сравнению с торцовой эта проблема актуальна. Особенно значительно изменение стехиометрического состава на боковых поверхностях сказывается при повторной поляризации пьезодатчиков после диффузионной сварки.

Существенная потеря оксида свинца при отжиге в вакууме по сравнению с отжигом на воздухе установлена также в работе [5], где отмечается, что процессы испарения свинца и кислорода в керамике ЦТС взаимосвязаны.

Авторы работы [6] провели исследование обжига сегнетомягких материалов в вакууме и водороде. После отжига пьезокерамические элементы были заполяризованы и в них измерили основные пьезоэлектрические характеристики. Сравнив полученные результаты, пришли к выводу, что после отжига пьезокерамика приобрела свойства, характерные для сегнетожестких материалов.

В данной работе методом рентгеноструктурного анализа исследовали фазовый состав керамики ЦТСНВ-1 и его изменение при повышенной температуре в вакууме и аргоне.

Рентгеносъемки при температуре 18—20 °С проводили на дифрактометре ДРОН-3М. Излучение FeK_α , $U_a = 30$ кВ, $I_{\text{тр}} = 50$ мА. Для высокотемпературных рентгеносъемок применяли гониометрическую приставку ГПВТ-1500, установленную на дифрактометре ДРОН-2. Излучение FeK_α , $U_a = 25$ кВ, $I_{\text{тр}} = 14$ мА. Давление в вакуумной камере гониометрической приставки во время съемок не выше $133 \cdot 10^{-6}$ Па, съемку вели при нагреве до 643, 1073 и 1173 К, в процессе охлаждения при 423 К и температуре 18—20 °С исходной пьезокерамики и пьезокерамики, нагретой и охлажденной в аргоне.

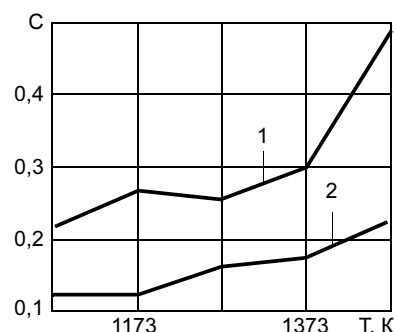


Рис. 1. Зависимость сублимации С свинца из пьезокерамики ЦТС-19 от температуры термической обработки в вакууме [1]: 1 — порошок; 2 — таблетка

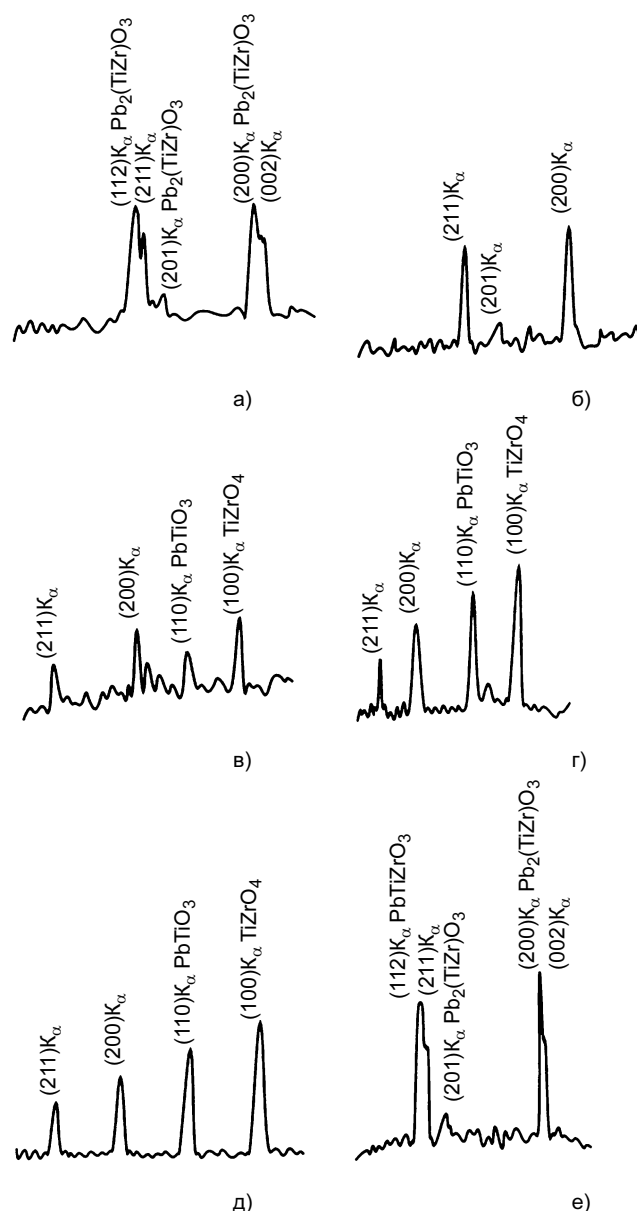


Рис. 2. Рентгенограммы поверхностного слоя пьезокерамики ЦТСНВ-1: а — исходная пьезокерамика (293 К); б — в вакууме, нагрев до 643, 1073 и 1173 К соответственно; в — при охлаждении в вакууме (423 К); д — в аргоне (1123 К)

Фазовый состав "сырой" пьезокерамики при температуре 18—20 °С представляет собой титанат-цирконат свинца $Pb_2(Ti, Zr)O_3$ с тетрагональной решеткой с дуплетными линиями (рис. 2). При нагреве до $T = 643$ К дуплеты исчезают, что свидетельствует о перестройке тетрагональной решетки в простую кубическую. Ширина линий уменьшается, что является следствием снижения микродеформаций кристаллической решетки (напряжение 2-го рода).

При $T = 1073$ К уменьшается высота пиков дифракционных отражений в результате экстинкции и появляется первый пик $(100)K_\alpha$ фазы $TiZrO_4$. Высота пиков фазы $Pb_2(Ti, Zr)O_3$ уменьшается.

При $T = 1173$ К обнаруживается первый пик $(100)K_\alpha$ фазы $PbTiO_3$. Пик $(100)K_\alpha$ $TiZrO_4$ растет, а пики, соответствующие фазе $Pb_2(Ti, Zr)O_3$, уменьшаются, что свидетельствует о количественном перераспределении фаз в поверхностном слое. Во время выдержки при этой температуре и при последующем медленном охлаждении до $T = 423$ К продолжается увеличение количества фаз $TiZrO_4$ и $PbTiO_3$ и уменьшение количества фазы $Pb_2(Ti, Zr)O_3$.

После охлаждения до температуры 18—20 °С фазовый состав поверхностных слоев состоит из $TiZrO_4$ (большая по количеству часть) и примерно равных количеств $Pb_2(Ti, Zr)O_3$ и $PbTiO_3$. На охлажденном образце, имевшем до нагрева палево-желтый цвет, обнаружено наличие светлого налета. После механического шлифования и полирования образца, подвергавшегося нагреву, проводили еще одну рентгено съемку, в результате которой установлено, что структура внутренних слоев идентична структуре "сырой" керамики.

В процессе рентгено съемки поверхностных слоев пьезокерамики, нагретой в аргоне, не выявлено существенных изменений фазового состава между "сырой" (исходной) керамикой и керамикой, нагретой до 1173 К.

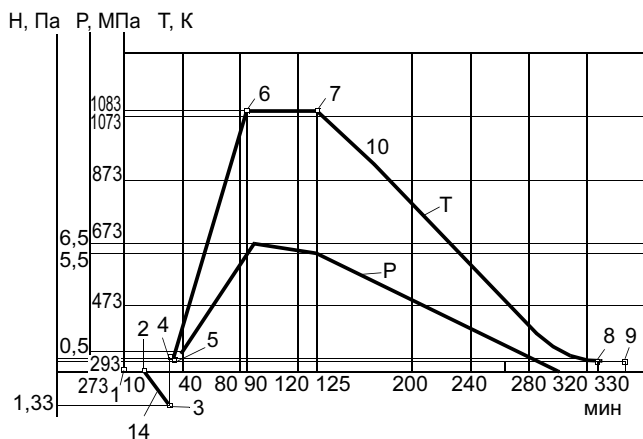


Рис. 3. Циклограмма технологического процесса диффузионной сварки пьезокерамики ЦТСНВ-1 с обмедненным коваром 29НК: 1, 2 — загрузка деталей; 2, 3 — вакуумирование; 3, 4 — напуск аргона; 5, 6 — нагрев; 6, 7 — изотермическая выдержка; 7, 8 — охлаждение; 8, 9 — выгрузка деталей

Таким образом, изменение фазового состава поверхностных слоев (несколько десятков мкм) образца можно объяснить частичным разложением фазы $Pb_2(Ti, Zr)O_3$ с образованием фаз $TiZrO_4$ и $PbTiO_3$ на поверхности образца в некотором слое, который в дальнейшем удаляется при механическом шлифовании.

Образцы, сваренные (нагретые) в аргоне, не претерпевают существенного изменения фазового состава пьезокерамики.

В процессе исследований разработан технологический процесс изготовления пьезодатчиков для векторных приемников и излучателей, в котором для сварки пьезопреобразователей использовали приспособление, позволяющее одновременно сваривать три узла в установках с контролируемой средой без системы нагружения. Давление на образцах при сварке обеспечивалось за счет разности ТКЛР свариваемых материалов и материалов, из которых изготовлено приспособление.

Процесс поляризации сваренных узлов проводили по отдельному технологическому процессу.

На рис. 3 приведена циклограмма технологического процесса диффузионной сварки пьезокерамики ЦТСНВ-1 с коваром 29НК.

ВЫВОД

Исследовано влияние вакуума и аргона на изменение фазового состава поверхностного слоя сегнетомягкой пьезокерамики. Выявлено, что при нагреве в вакууме на поверхности пьезокерамики в слое толщиной около 0,5 мм происходит частичное разложение фазы $Pb_2(Ti, Zr)O_3$ с образованием фаз $TiZrO_4$ и $PbTiO_3$, что приводит к снижению пьезоэлектрических характеристик пьезопреобразователей. В аргоне фазовый состав боковой поверхности пьезокерамики в процессе сварки не претерпевает существенных изменений, что позволяет получать пьезопреобразователи с заданными свойствами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михеев А. А., Прокопьев С. В. Формирование переходной зоны при диффузионной сварке пьезокерамики // Сварочное производство. 2008. № 3. С. 25—28.
2. Особенности влияния процесса диффузионной сварки на свойства пьезокерамики ЦТС-19 и ее соединений со сплавом АМг6 / В. А. Бачин, Н. Ф. Казаков и др. // Сварочное производство. 1986. № 8. С. 5—6.
3. Бачин В. А. Диффузионная сварка стекла и керамики с металлами. М.: Машиностроение, 1986. 184 с.
4. Прокопьев С. В., Новиков В. Г., Мишин А. С. Влияние параметров диффузионной сварки пьезокерамики с металлом на свойства пьезопреобразователей // Перспективные пути развития сварки и контроля. Воронеж: ВГАСУ, 2001. С. 235—238.
5. Яффе Б., Кук К., Яффе Г. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Мир, 1974. 288 с.
6. Павлов В. С., Турков С. К., Бессонова Э. Н. Влияние концентрации точечных дефектов на внутреннее трение поликристаллического цирконата-титаната свинца // Физика твердого тела. 1971. Т. 13. Вып. 3. С. 897—900.

А. И. КОРЧАГИН, д-р физ.-мат. наук, Г. Ю. ЗУБРИЛОВ, инж.

Перспективы применения коллоидных растворов в качестве смазочных материалов при квазистатическом трении скольжения

При полунепрерывном литье алюминиевых слитков триботехническая система кристаллизатор—слиток должна обеспечивать предельно низкие значения коэффициентов трения $f_{тр}$ — порядка 0,001 и ниже, так как напряжения, вызванные силами трения, не должны превышать значения стандартных характеристик прочности твердой фазы вблизи точки плавления [1]. Все попытки повысить трибологические характеристики алюминиевых сплавов, используемых для изготовления кристаллизаторов, известными методами поверхностной обработки не привели к желаемым результатам [2].

Требуемых значений коэффициента $f_{тр}$ можно достичь лишь в режиме жидкостного или гидродинамического трения, что невозможно реализовать при низких скоростях скольжения (порядка 1 мм/с).

Кроме того, в отличие от классического трения данный режим отличается вновь формирующейся поверхностью контртела слитка, отсутствием стационарного режима. Поэтому возможность формирования несущей смазочной пленки с требуемым $f_{тр}$ приходится относить лишь к поверхности кристаллизатора, а период ее формирования можно выносить на подготовку кристаллизатора. В основе реализации этого процесса может лежать адсорбция некоторых поверхностно-активных веществ, в частности жирных кислот, которые образуют достаточно устойчивый антифрикционный молекулярный слой, способный обеспечивать необходимые антифрикционные показатели.

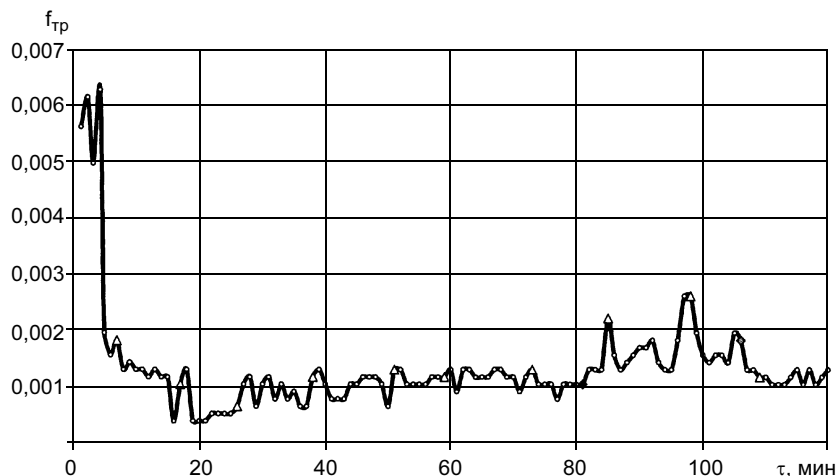
В данной работе исследовали смазочные композиции на основе рапсового масла, в состав которого входят более 10 жирных кислот с карбоксильной группой COOH [3]. В качестве присадки использовали смесь полимеров "Лубризол", состоящую из сополимеров стирола этилена и пропилена с соотношением 1 : 2 : 1, объемная доля которой составляет 1 %.

Испытание смазок с целью измерения коэффициента трения при температурах свыше 200 °С, скорости скольжения 1—2 мм/с и удельной нагрузке 20 Н/мм² проводили по ГОСТ 9490—75 на машинах

трения МАСТ-1 и КТ-2 с измененными формой и размерами контртел [4, 5]. Установки позволяют нагревать узел трения от 20 до 400 °С при частоте вращения верхнего образца 1 мин⁻¹. Одно из контртел, имитирующих функцию поверхности кристаллизатора, предварительно подвергали тепловому модифицированию при 250 °С в подготовленной смазочной композиции в течение 30 мин. В результате происходит адсорбирование полимолекул жирных кислот и полимеров, формирующих смазочный слой, обеспечивающий низкий коэффициент $f_{тр}$ в условиях малых скоростей скольжения. Результаты эксперимента приведены на рисунке. Установили, что жидкоподобное трение с приведенными выше значениями $f_{тр}$ реализуется в результате физико-химических процессов, протекающих в зоне контакта [6].

Функциональные свойства смазочных материалов в настоящее время не имеют однозначных количественных показателей, поскольку последние определяются составом, структурой и свойствами граничных смазочных слоев, которые формируются в процессе трения в зависимости от множества условий.

Свойства смазочных граничных слоев под влиянием физических и химических воздействий изменяются в зависимости от межмолекулярного взаимодействия, которое в структурированных системах всегда выше, чем в истинных растворах. В связи с чем представляет интерес исследование коллоидных растворов полимеров в растительных маслах.



Зависимость $f_{тр}$ от времени испытания рапсовой смазки при контактировании алюминиевых поверхностей при двукратном увеличении и снижении нагрузки

Переходы истинный раствор—коллоидный раствор обратимы как по концентрации, так и по температуре.

Мицеллы — агрегаты высокомолекулярных углеводов — сорбируют масло своей поверхностью и внутренними слоями. При высокой концентрации мицеллы образуют неправильную структурную сетку геля, полости которой заполнены жидкостью.

Группы правильно расположенных мицелл (беспорядочное соединение малых частиц при деформации увеличивает долю свободной жидкости в зоне трения) принимают участие в деформации жидкости, поэтому при деформации частицы растворителя выжимается из нее и количество свободной жидкости в зоне трения, таким образом, будет увеличиваться.

Наиболее важная характеристика описываемых мицеллярных систем — так называемая критическая концентрация мицеллообразования (ККМ), соответствующая стадии образования начальных мицелл, по достижении которой параметры системы резко изменяются. В растворах полимеров межмолекулярное взаимодействие приводит к резкому повышению вязкости, и обычно содержание полимеров в таких растворах составляет менее 1 %, что может не соответствовать ККМ. В достижении ККМ, как и вообще в формировании граничных смазочных слоев, ведущая роль принадлежит адсорбции. При этом реакции, протекающие на активных центрах и вне их, могут идти независимо друг от друга. Меняя структуру активных центров, можно варьировать каталитические реакции на поверхности.

Проблема определения абсолютного количества вещества, адсорбированного при наличии растворителя, зависит от вида взаимодействия растворителя и растворимого вещества с адсорбируемой поверхностью, взаимного сродства растворителя и растворимого вещества. Особенно характерна селективность взаимодействия при химической адсорбции, так как специфичность и избирательность образования новых связей очень высоки. Факторы, влияющие на селективность, многочисленны и основным из них является сродство компонентов к поверхности адсорбента, которое определяется свойствами адсорбата, адсорбента и растворителя. Наличие на поверхности адсорбата функциональных групп, способных к специфическим взаимодействиям, способствует адсорбированию веществ, склонных к таким взаимодействиям.

Увеличение концентрации высокомолекулярных соединений с большой поверхностной активностью может приводить к образованию мицелл в раство-

ре и на межфазной поверхности, что равнозначно возникновению новой фазы. Высокомолекулярные ПАВ склонны к образованию конденсированных пленок значительной толщины, особенно при "вертикальном" положении молекул на адсорбируемой поверхности, а в некоторых случаях к образованию петель. Это соответствует формированию ламинарных мицеллярных слоев, обеспечивающих формирование пленки слоя растворителя между контактирующими поверхностями. В зависимости от взаимодействия между частицами адсорбата и поверхностью будет происходить непрерывное образование такой сверхструктуры либо островков, когда поверхность покрывается пятнами.

Значимость подхода к поверхностным процессам на основе представления о поверхностных состояниях заключается в том, что он позволяет отвлечься от природы этих состояний и оценивать только их проявления. Такой подход может оказаться более полноценным при решении прикладных задач, в частности, когда структурно-механические и реологические свойства смазочных слоев являются определяющими факторами.

Методы реологии можно применять для анализа структуры и описания вязкотекучих свойств дисперсных систем, которые могут существенно отличаться от идеальных законов. Таким образом можно получить более детальную информацию о критической концентрации структурообразования, оптимальных содержаниях дисперсной фазы и растворителя, необходимых для образования граничных жидкоподобных сверхструктур.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Влияние полифениленсульфида на термостабильность смазочных композиций для литья алюминиевых деформируемых сплавов / Д. Н. Евсеева, Г. И. Кадышева, Л. С. Чернышова, А. И. Корчагин // Технология легких сплавов. М.: ВИАЛС, 1986. Вып. 10. С. 25—28.
2. Schneider-Ramelow M., Grosch I. Induktives Randschleigieren von Aluminicum-Knetlegierungen von Nickel // HTM: Harter. — techn. Mitt. 1999. Vol. 54. № 1. P. 32—37.
3. Тютюнников Б. Н. Химия жиров. М.: Пищевая промышленность, 1974. 448 с.
4. Матвеевский Р. М. Исследование температурной стойкости смазочных слоев при трении // Трение износ. 1980. Т. 1. № 1.
5. Матвеевский Р. М., Лазовская О. В. К методике определения критической температуры слоя смазки при трении стали по пластичным материалам на машине КТ-2 // Методы испытания на изнашивание. М.: АН СССР, 1962. 176 с.
6. Моррисон С. Химическая физика поверхности твердого тела. М.: Мир, 1980. 487 с.

Ю. О. МАЛЫШЕВ, инж.
ОАО "НПП "Эталон" (Омск)

Калибраторы серии КС — переносная поверочная лаборатория, удовлетворяющая требованиям ГОСТ Р 8.624—2006

Микропроцессорные калибраторы температуры уже давно получили широкое применение за рубежом. По информации сотрудников ФГУП "ВНИИМС"¹ [2], в Европе до 80 % всех калибровок промышленных термометров выполняют с помощью калибраторов температуры. В настоящее время в России многие поверочные, калибровочные и измерительные лаборатории оснащены калибраторами температуры отечественного и зарубежного производства.

Рассмотрим этот класс поверочного оборудования с точки зрения практического применения. Для оценки эффективности применения калибраторов температуры при поверке термометров сформулируем основные требования к ним:

- соответствие требованиям действующих отечественных стандартов (в ГОСТ Р 8.624—2006 содержатся четкие и обоснованные требования к калибраторам температуры);

- обеспечение по возможности большей точности поверочных работ и реализация большего диапазона температур для расширения номенклатуры поверяемых в нем термометров;

- малое время выхода на температурный режим и возможность одновременной поверки нескольких термометров для обеспечения высокой производительности поверки;

- малые габаритные размеры и масса для экономии рабочего пространства в поверочной лаборатории и обеспечения удобства его транспортировки к месту эксплуатации поверяемых термометров при проведении поверки за пределами поверочной лаборатории;

- удобная система управления, легко читаемый экран, связь с компьютером для частичной автоматизации поверочных работ;

- дополнительные возможности, расширяющие область его применения и делающие его более привлекательным и удобным для применения при поверке, диагностике и контроле термометров.

Рассмотрим калибраторы КС 100-1 и КС 600-1 производства ОАО "НПП "Эталон" с точки зрения изложенных требований.

ГОСТ Р 8.624—2006 предъявляет к калибраторам температуры следующие требования:

- каналы в выравнивающем блоке должны иметь изотермическую зону длиной не менее длины чувствительного элемента поверяемого термометра, в любом случае не менее 40 мм;

- нестабильность поддержания температуры в канале блока за время не менее 30 мин после установления стационарного режима калибратора должна быть не более 1/5 допуска поверяемых ТС;

- расхождение значений температуры между каналами блока (горизонтальный перепад температуры) должно быть не более 1/5 допуска поверяемых ТС;

- вертикальный перепад температуры в изотермической зоне блока не должен превышать 1/3 допуска поверяемых ТС, неравномерность температуры на длине ЧЭ — не более 1/5 допуска поверяемых ТС.

Параметры калибраторов КС 100-1 и КС 600-1 в сравнении с требованиями ГОСТ Р 8.624—2006 приведены в табл. 1 и 2.

Как видно из таблиц, калибраторы КС 100-1 и КС 600-1 удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 8.624—2006 и пригодны для поверки термометров сопротивления классов А, В или С при использовании внешнего термометра с индивидуальной градуировкой (далее ТСИ) во всем диапазоне воспроизводимых температур, без него калибраторы пригодны для поверки датчиков классов В и С.

На рис. 1 показаны расположение и диаметры колодцев для установки термометров в калибраторах КС 100-1 и КС 600-1.

В калибраторе КС 100-1 или КС 600-1 с применением ТСИ, который рекомендуется устанавливать в центральный колодец, допускается одновременно поверять до четырех средств измерения температуры, диаметр каждого из которых не должен превышать 6 мм. При этом диаметры колодцев калибраторов позволяют выполнять требование ГОСТ Р 8.624—2006, нормирующее зазор между поверяемым термометром и колодцем калибратора. По ГОСТ Р 8.624—2006 в диапазоне температур от –80 до 660 °С внутренний диаметр канала должен отличаться от внешнего диаметра поверяемого термометра не более чем на 0,5 мм. При этом ТСИ имеет изогнутую конструкцию корпуса (стержня), что позволяет выполнять поверку термометров с большой монтажной головкой.

¹ Васильев Е. В., Игнатов А. А., Бахарев А. Н. Минимизация размеров ампулы реперной точки галлия для применения в переносных твердотельных микропроцессорных калибраторах температуры. М.: ФГУП "ВНИИМС", 2007.

Таблица 1

Техническая характеристика	Характеристика, требуемая по ГОСТ Р 8.624, не более	КС 100-1 (ОАО "НПП "Эталон")
Диапазон рабочих температур (при 20 °С), °С	—	–10—100
Абсолютная погрешность воспроизведения, °С: — с использованием внешнего ТСИ (термометр с индивидуальной градуировкой подключается к калибратору) — без использования внешнего ТСИ	1/3 допуска А: $\pm 0,05$ °С в точке $t = 0$ А: $\pm 0,117$ °С в точке $t = 100$ °С В: $\pm 0,1$ °С в точке $t = 0$ В: $\pm 0,267$ °С в точке $t = 100$ °С	$\pm(0,05 + 0,0006t)$ $\pm 0,05$ (А, В, С) $\pm 0,11$ (А, В, С) $\pm(0,1 + 0,001t)$ $\pm 0,1$ (В, С) $\pm 0,2$ (В, С)
Нестабильность поддержания температуры, °С	1/5 допуска АА: $\pm 0,02$ °С в точке $t = 0$ АА: $\pm 0,054$ °С в точке $t = 100$ °С	$\pm(0,02 + 0,0001t)$ $\pm 0,02$ (АА, А, В, С) $\pm 0,03$ (АА, А, В, С)
Горизонтальный перепад, °С	1/5 допуска А: $\pm 0,03$ °С в точке $t = 0$ А: $\pm 0,07$ °С в точке $t = 100$ °С	$\pm(0,03 + 0,0004t)$ $\pm 0,03$ (А, В, С) $\pm 0,07$ (А, В, С)
Вертикальный перепад в рабочей зоне, °С	1/5 допуска А: $\pm 0,03$ °С в точке $t = 0$ А: $\pm 0,07$ °С в точке $t = 100$ °С	$\pm(0,03 + 0,0004t)$ $\pm 0,03$ (А, В, С) $\pm 0,07$ (А, В, С)
Измерение (преобразование) сигналов ТС, ТП, U, R	—	Есть
Длина рабочей зоны, мм	≥ 40	40
Глубина/диаметр колодца, мм	—	180/35
Время выхода на режим стабилизации, мин	—	45
Потребляемая мощность, Вт	—	200
Температура окружающего воздуха, °С	—	15—25
Габаритные размеры, мм	—	450 × 250 × 450
Масса, кг	—	20
Комплект поставки	—	Калибратор, металлические вставки — 3 шт., ТСИ, СПО, документация

Обозначение. А, В, С — класс термометров; t — температура.

Калибраторы КС 100-1 и КС 600-1 (см. табл. 1, 2) имеют время выхода на режим стабилизации температуры 45 мин. Это небольшое время позволяет повысить скорость перехода с одной температурной точки на другую, а значит, и производительность поверки при необходимости работы в нескольких температурных точках в течение одного рабочего дня.

Калибраторы имеют настольную конструкцию корпуса. Их габаритные размеры 450 × 250 × 450 позволяют на обычном письменном столе одновременно размещать до четырех калибраторов и таким образом эффективно использовать рабочее пространство в поверочной лаборатории. Также благодаря небольшим габаритным размерам и приемлемой для транспортировки массе 20 кг калибраторы серии КС вполне можно применять для поверки непо-

Таблица 2

Техническая характеристика	Характеристика, требуемая по ГОСТ Р 8.624, не более	КС 600-1 (ОАО "НПП "Эталон")
Диапазон рабочих температур (при 20 °С), °С	—	50—600
Абсолютная погрешность воспроизведения, °С: — с использованием внешнего ТСИ (термометр с индивидуальной градуировкой подключается к калибратору) — без использования внешнего ТСИ	1/3 допуска А: $\pm 0,083$ °С в точке $t = 50$ °С А: $\pm 0,45$ °С в точке $t = 600$ °С В: $\pm 0,183$ °С в точке $t = 50$ °С В: $\pm 1,1$ °С в точке $t = 600$ °С	$\pm(0,05 + 0,0006t)$ $\pm 0,08$ (А, В, С) $\pm 0,41$ (А, В, С) $\pm(0,1 + 0,001t)$ $\pm 0,15$ (В, С) $\pm 0,7$ (В, С)
Нестабильность поддержания температуры, °С	1/5 допуска АА: $\pm 0,037$ °С в точке $t = 50$ °С АА: $\pm 0,224$ °С в точке $t = 600$ °С	$\pm(0,02 + 0,0001t)$ $\pm 0,025$ (АА, А, В, С) $\pm 0,08$ (АА, А, В, С)
Горизонтальный перепад, °С	1/5 допуска А: $\pm 0,05$ °С в точке $t = 50$ °С А: $\pm 0,27$ °С в точке $t = 600$ °С	$\pm(0,03 + 0,0004t)$ $\pm 0,05$ (А, В, С) $\pm 0,27$ (А, В, С)
Вертикальный перепад в рабочей зоне, °С	1/5 допуска А: $\pm 0,05$ °С в точке $t = 50$ °С А: $\pm 0,27$ °С в точке $t = 600$ °С	$\pm(0,03 + 0,0004t)$ $\pm 0,05$ (А, В, С) $\pm 0,27$ (А, В, С)
Измерение (преобразование) сигналов ТС, ТП, U, R	—	Есть
Длина рабочей зоны, мм	≥ 40	40
Глубина/диаметр колодца, мм	—	160/44
Время выхода на режим стабилизации, мин	—	45
Потребляемая мощность, Вт	—	3000
Температура окружающего воздуха, °С	—	15—25
Габаритные размеры, мм	—	450 × 250 × 450
Масса, кг	—	25
Комплект поставки	—	Калибратор, металлические вставки — 3 шт., ТСИ, СПО, документация

средственно на месте эксплуатации и монтажа поверяемых термометров. Кроме этого, калибраторы серии КС имеют встроенный измеритель, отображающий показания ТСИ и поверяемого термометров непосредственно в градусах Цельсия, т. е. с пере-

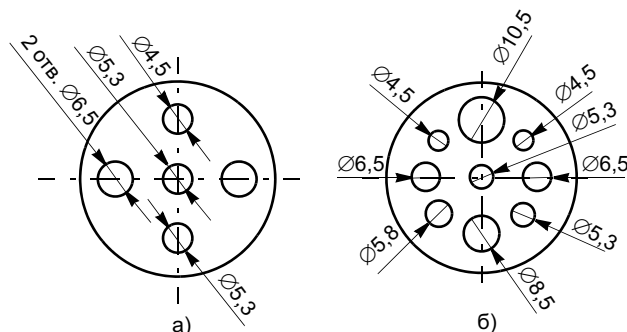


Рис. 1. Выравнивающие блоки с колодцами, применяемые в калибраторах КС 100-1 (а) и КС 600-1 (б)

счетом в температуру. Наличие встроенного измерителя в калибраторе избавляет поверителя от необходимости применения внешнего регистрирующего прибора, оснащенного своими присоединительными кабелями, а функция автоматического пересчета измеренных значений сигналов поверяемых термометров в температуру упрощает, а значит, и ускоряет процесс поверки. Во встроенном измерителе калибраторов реализована функция автоматического расчета разницы между температурами, измеренными ТСИ и поверяемым термометром, что обеспечивает дополнительное удобство при поверке.

Калибраторы серии КС имеют хорошо читаемый монохромный ЖК-дисплей. На рис. 2 приведены вводимые на дисплей символы и значения. Все режимы работы и установки калибраторов задаются при помощи четырех кнопок, расположенных на их лицевой панели.

Для удобства работы калибраторы имеют возможность подключения к персональному компьютеру посредством последовательного интерфейса RS-232. Сервисное программное обеспечение выполняет две основные задачи: обработку результатов измерений и обслуживание самого калибратора.

Программное обеспечение позволяет в графическом и табличном виде фиксировать показания ТСИ, поверяемого термометра и регулятора температуры с течением времени.

В процессе эксплуатации калибраторов необходимо периодически выполнять калибровку встроенного измерителя и корректировать параметры ТСИ по результатам очередной поверки этого термометра либо при полной его замене. Эти работы легко выполняются при помощи сервисного программного обеспечения калибраторов.

В последнее время значительно расширилась область применения эталонных 3-го разряда платиновых термометров сопротивления с металлической оболочкой. Эксплуатация этих термометров требует соблюдения дополнительных правил их применения и метрологического обслуживания. Одним из таких правил является проведение периодического контроля изменения сопротивления термометра при какой-либо постоянной температуре, т. е. в одной из реперных точек температурной шкалы. Известно, что для контроля стабильности эталонных 1-го и 2-го разрядов платиновых термо-

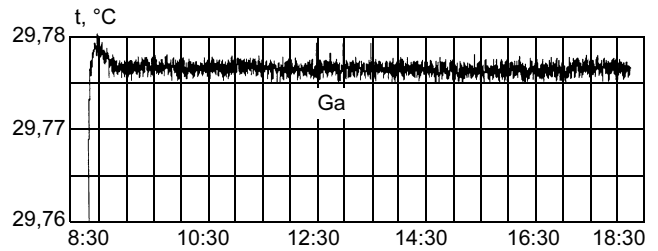


Рис. 3. Кривая плавления галлия, полученная при ее реализации в калибраторе КС 100-1

метров сопротивления в период эксплуатации предусмотрено измерение их сопротивления в тройной точке воды ($0,01^{\circ}\text{C}$). Однако этот метод по причине его трудоемкости не может быть рекомендован для контроля стабильности эталонных 3-го разряда платиновых термометров сопротивления. В связи с этим для контроля стабильности эталонных 3-го разряда и прецизионных термометров сопротивления в условиях поверочных, калибровочных и измерительных лабораторий специалисты ФГУП "ВНИИМС" предлагают более простой метод, заключающийся в периодическом контроле стабильности данных термометров в точке плавления галлия [1]. Достоинствами этой реперной температурной точки является простота подготовки ампулы галлия к работе, возможность ее воспроизведения в жидкостных и твердотельных термостатах и калибраторах температуры, а также возможность минимизации размеров ампулы, так как температура плавления галлия ($29,7646^{\circ}\text{C}$) близка к температуре окружающего воздуха, в связи с чем не требуется обеспечивать большую глубину погружения термометра сопротивления стержневого типа.

Решение этой задачи возможно при помощи калибратора КС 100-1, в котором обеспечена возможность реализации реперной точки плавления галлия. На рис. 3 приведена типичная кривая плавления галлия, полученная при ее реализации в калибраторе КС 100-1.

Для реализации точки плавления галлия применяли ампулу производства ОАО "НПП "Эталон" диаметром 35 мм, длиной 180 мм, колодец для установки термометра диаметром 6 мм, длиной 160 мм, 100 мм колодца погружали в расплавленный металл.

Продолжительность "площадки" плавления составляет более 9 ч (см. рис. 3). Кривая плавления галлия находится в интервале $\pm 1,5\text{ мК}$, что достаточно для контроля сопротивления нескольких эталонных термометров за один рабочий день.

Таким образом, калибраторы серии КС производства ОАО "НПП "Эталон" являются современным метрологическим оборудованием, способным решать основные и второстепенные задачи как в поверочной лаборатории, так и за ее пределами с высокой точностью и в соответствии с требованием действующих отечественных стандартов.

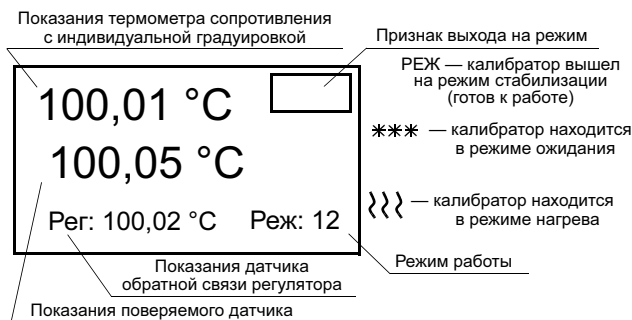


Рис. 2. Вид индикатора калибраторов серии КС

В. С. ГУЗЕВ, инж., В. М. ШУМЯЧЕР, д-р техн. наук
Волжский институт строительства и технологий (филиал)
Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета

Повышение эффективности алмазного хонингования деталей гидроаппаратуры за счет выбора рациональных режимов обработки

Обработка прецизионных отверстий в деталях гидроаппаратуры представляет важную проблему, так как необходимо получить высокую точность формы отверстия, его размера, а также высококачественную поверхность, обеспечивающую надежную работу таких изделий, как корпуса гидрпанелей и золотниковые распределители. В золотниковом распределителе перемещение его рабочего органа относительно корпуса происходит в направлении, поперечном движению потока рабочей жидкости под давлением до 20 МПа [1].

Диаметральный зазор в золотниковой паре для отверстий диаметром до 25 мм должен составлять 4—7 мкм, отклонение от цилиндричности не бо-

лее 5 мкм, параметр шероховатости поверхности $Ra = 0,16$ мкм.

Помимо высоких требований к точности формы и размеров детали гидроаппаратуры характеризуются определенным соотношением длины и диаметра отверстия (4:1—8:1) и наличием кольцевых выточек, при этом рабочие пояски должны иметь отсечные кромки с радиусом скругления не более 0,2 мм [2].

Наличие выточек и поясков, их размеры и взаимное расположение существенно влияют на выбор параметров процесса алмазного хонингования, таких как характеристика брусков, режимы обработки, величина перебега брусков. Однако, как показывает анализ исследований [3], данные о назначении указанных режимов отсутствуют.

Детали гидроаппаратуры с прерывистыми отверстиями в более 50 % случаев изготавливают из чугуна СЧ21 (180—220 НВ) при диаметре отверстий 15—25 мм, длине 50—220 мм, как правило, с симметричным расположением поясков и выточек.

Для оценки отверстий с различными размерами поясков и выточек и их симметричным расположением введен коэффициент прерывистости (рис. 1)

$$K_{пр} = 1 - \frac{l_v(l_{отв} - l_n)}{l_{отв}(l_v + l_n)}$$

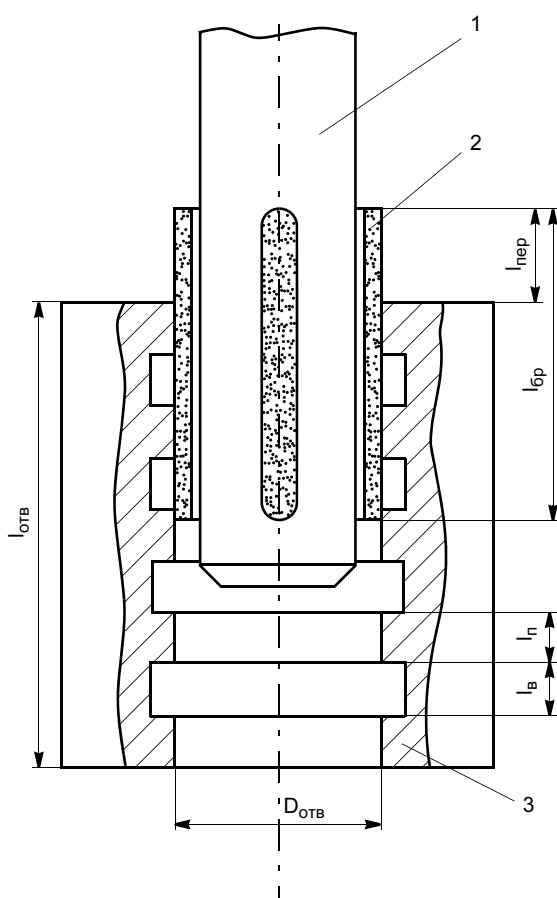


Рис. 1. Схема хонингования прерывистых отверстий: 1 — хонголовка; 2 — абразивный брусок; 3 — обрабатываемая заготовка

Длина отверстия $l_{отв}$, мм	Длина пояска l_n , мм	Длина выточки l_v , мм	$K_{пр}$
75	5	2	0,733
		4	0,585
		6	0,491
		10	0,380
100	5	2	0,728
		4	0,578
		6	0,482
		10	0,367
150	5	2	0,724
		4	0,570
		6	0,473
		10	0,355
200	5	2	0,721
		4	0,567
		6	0,468
		10	0,350

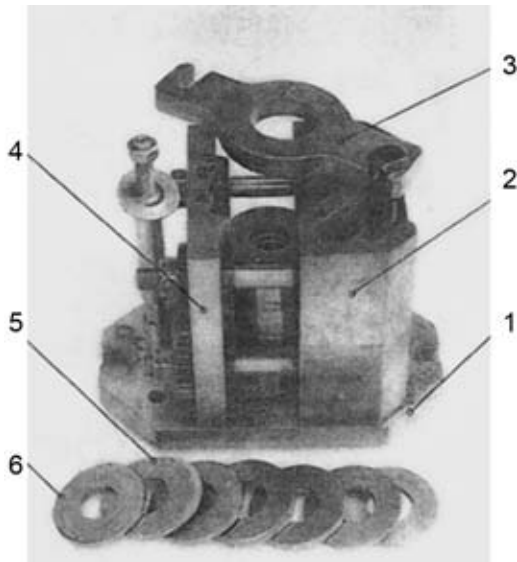


Рис. 2. Установочное приспособление с набором колец: 1 — основание; 2 — призма; 3 — планка прижимная; 4 — плита прижимная; 5 — кольцо-выточка; 6 — кольцо-поясок

При исследовании процесса хонингования деталей из чугуна СЧ21 с прерывистыми отверстиями испытывали образцы разной длины и формы, имеющие различный коэффициент прерывистости $K_{пр}$ (см. таблицу). Для этого использовали приспособление (рис. 2).

Хонингование выполняли на установке, созданной на базе хонинговального станка модели 3821 (рис. 3). В качестве СОЖ использовали керосин (80 %) с добавлением масла Индустриальное-20 (20 %). Применяли алмазные хонинговальные бруски длиной 100 мм, шириной 6 мм, зернистостью 80/63 концентрацией 100 % на связке М1.

Хонинговальная головка плавающего типа, четырехбрусковая, с двумя шарнирами Гука.

Режим обработки: скорость вращения хонголки $v_{окр} = 31,4$ м/мин; скорость возвратно-поступательного движения хонголки $v_{вп} = 15$ м/мин; радиальная подача брусков на движение хода хонголки $S_p = 0,2$ мкм/дв. ход.

При хонинговании отверстий задавали такую кинематику движения хонинговальных брусков, при которой возникала сетка следов обработки, пересекающихся под углом $50-90^\circ$, что является оптимальным условием эффективного микрорезания с образованием короткой стружки, легко удаляемой из подбрускового пространства.

Установленные режимы обработки позволили обеспечить угол пересечения $\alpha = 51^\circ$ (рис. 4).

В результате исследований установили зависимость съема металла, шероховатости и отклонение от цилиндричности (рис. 5, 6).

Интенсивность съема металла растет по мере продолжительности хонингования, но в большей сте-

пени в первые 30 с обработки, так как бруски врезаются и снимают острые вершины шероховатой поверхности. В этот период обработки происходит самозатачивание брусков и повышенный съем металла, затем процесс обработки стабилизируется и происходит затухание (см. рис. 5).

Характерной особенностью является повышенный съем металла у отверстий с уменьшенным коэффициентом прерывистости. Объясняется это тем, что происходит уменьшение площади опорной поверхности бруска с деталью, давление увеличивается, зерна глубже проникают в металл. Наличие радиальных выточек позволяет интенсивнее вымывать стружку и продукты износа из подбрускового

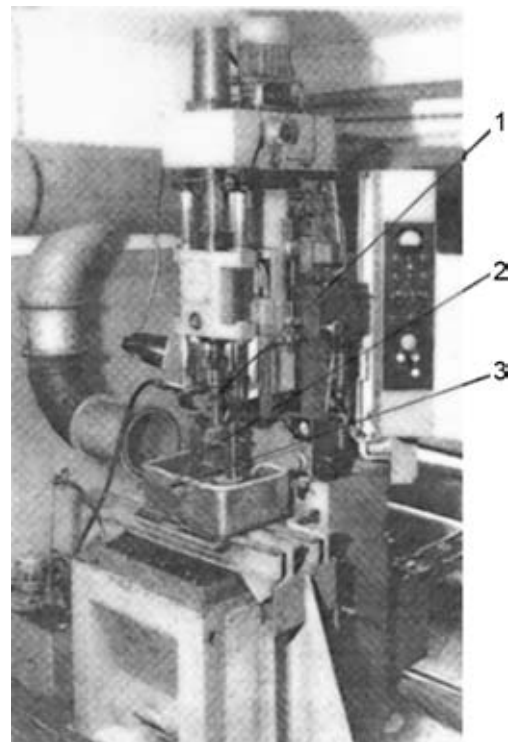


Рис. 3. Общий вид установки: 1 — хонголка "плавающего" типа; 2 — установочное приспособление с опытным образцом детали; 3 — двухкомпонентный тензометрический динамометр

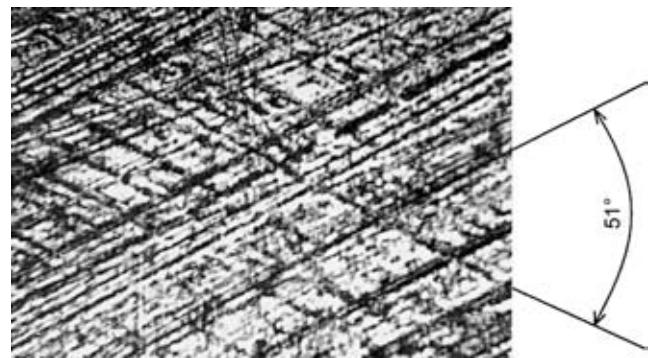


Рис. 4. Поверхность образца, обработанного брусками АСВ 80/63 М1 100 %

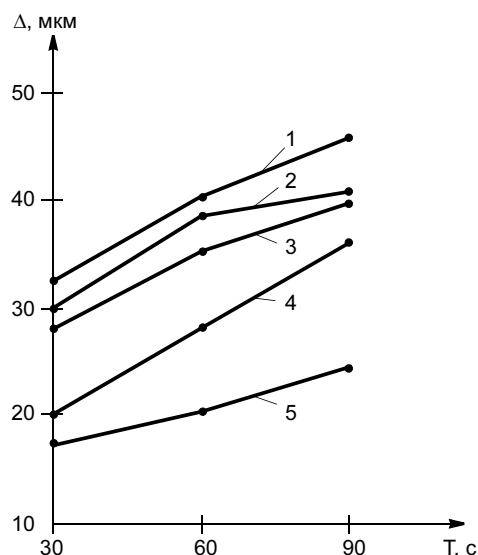


Рис. 5. Зависимость линейного съема металла на диаметр отверстия от времени хонингования: 1—5 — $K_{пр}$ равен 0,36, 0,48, 0,58, 0,73 и 1,00 соответственно

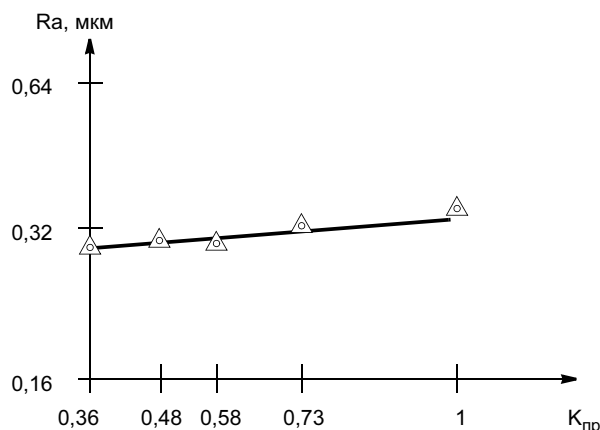


Рис. 6. Зависимость параметра шероховатости поверхности Ra от коэффициента прерывистости $K_{пр}$

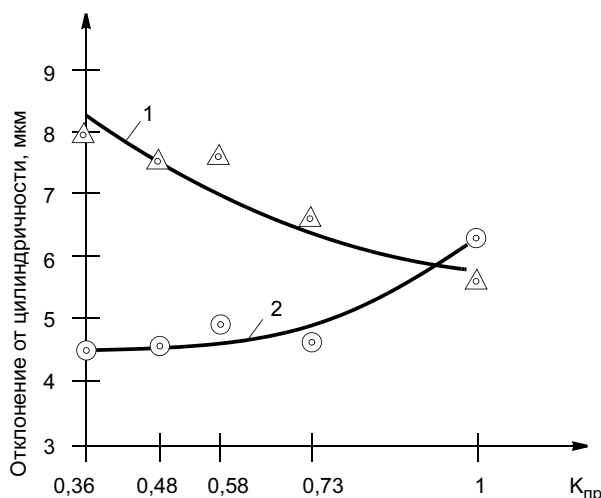


Рис. 7. Зависимость точности обработки от коэффициента прерывистости и перебега хонинговальных брусков: 1 — перебег $1/3 l_{бр}$; 2 — $1/4 l_{бр}$

пространства, в результате алмазные зерна в меньшей степени подвержены затуплению и выкрошиванию, процесс засаливания отсутствует, создается благоприятное условие для микрорезания.

Шероховатость поверхности при обработке деталей с различной степенью прерывистости практически остается неизменной, т. е. форма и размеры кольцевых выточек не влияют на формирование микро рельефа поверхности. В то же время шероховатость гладкого отверстия несколько выше, предположительно за счет худших условий вымывания стружки и продуктов износа из подбрускового пространства (см. рис. 6).

Геометрические параметры при обработке в значительной степени зависят от величины перебега хонинговальных брусков.

На рис. 7 видно, что при перебеге, равном $1/3 l_{бр}$, отклонение от цилиндричности гладкого отверстия составляет 5—6 мкм, у прерывистых отверстий при том же перебеге отклонение увеличилось до 8—9 мкм за счет более интенсивного съема металла на краевых участках у торцов отверстия, что приводит к образованию корсетообразной формы отверстия.

С уменьшением перебега до $1/4 l_{бр}$ корсетность при обработке прерывистых отверстий исчезает, отклонение от цилиндричности 4—6 мкм, в то же время гладкое отверстие стремится к бочкообразной форме, его отклонение от цилиндричности составляет 6—7 мкм.

Таким образом, перебег хонинговальных брусков при обработке прерывистых отверстий должен быть меньше, чем при обработке гладкого отверстия. Время обработки прерывистых отверстий в большей степени влияет на скорость съема металла, чем гладких отверстий, поэтому время рабочего цикла в зависимости от припуска должно составлять 30—60 с.

Шероховатость поверхности при хонинговании отверстий с различным коэффициентом прерывистости практически остается неизменной.

Эффективность алмазного хонингования деталей гидроаппаратуры (производительность, точность и шероховатость обработанной поверхности) может быть повышена за счет подобранных режимов обработки, величины перебега и характеристики хонинговальных брусков.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль П. В. Гидропривод горных машин. М.: Недра, 1967. 387 с.
2. Башта Т. М. Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
3. Назаров А. К., Соболев П. Н., Калинин Е. В. Алмазное хонингование глухих и сквозных прерывистых отверстий // Синтетические алмазы. Киев, 1973. Вып. 4. С. 45—46.

В. Б. МОРДЫНСКИЙ, канд. техн. наук, А. С. ТЮФТЯЕВ, канд. техн. наук,
Т. Ф. ТАЗИКОВА, инж., А. Г. ХАЧАТУРОВА, инж.
Объединенный институт высоких температур РАН

Возможности плазменных технологий для повышения ресурса теплоэнергетического оборудования (обзор)¹

На период до 2020 г. энергетической стратегией России предполагается рост энергопотребления на 1,8—2,5 % в год и предусмотрено пересмотреть государственную энергетическую политику в стране. Одной из предпосылок к такому шагу является исчерпание резервов мощности и предельный износ оборудования. Новая политика не ограничивается только электроэнергетикой. Вторым крупнейшим ее блоком является разработка стратегии развития отечественного энергомашиностроения. При этом решение накопившихся проблем и полнокровное развитие энергетики невозможно без опоры на современные фундаментальные исследования и их приложения в инженерных разработках [1].

Согласно прогнозам, доля твердого топлива в мировой теплоэнергетике в ближайшие 30—50 лет будет возрастать, что не снизит остроту уже существующих затруднений. Так, до 15 ГВт генерирующих мощностей планируется ввести на тепловых электростанциях Сибири, потребность в угле которых может быть обеспечена за счет Канско-Ачинского бассейна [2].

По общепризнанным оценкам, в настоящее время оборудование ТЭС характеризуется в основном как физически изношенное и морально устаревшее [3—8]. Решение задачи обновления оборудования является очень сложным из-за наличия значительного числа (около 300) электростанций, на которых установлено несколько тысяч единиц только основного оборудования. Поэтому снижение затрат на ремонтно-восстановительные работы является одной из составных частей программы [3—6], в соответствии с которой намечены и уже происходят значительные структурные и качественные изменения в ремонтном обслуживании энергетического оборудования генерирующих компаний [5].

В целом теплоэнергетическое оборудование подвергается эрозии при кавитации воды и циклическом ударном воздействии воды и пара, эрозии в условиях непрерывного ударного действия потока рабочей среды, эрозии в условиях щелевого потока воды и пара, абразивному, газо- и гидроабразивному изнашиванию и их сочетаний в условиях коррозионного воздействия среды при повышенной или высокой температуре [2—12].

Из опыта многолетней эксплуатации, например паровых турбин различных типов, известны серьезные проблемы, вызванные негативным влиянием постоянно действующих эксплуатационных факторов. К ним относятся износ и повреждения элементов проточной части турбин, в том числе абразивный эрозионный износ сопловых и направляющих аппаратов, рабочих лопаток регулирующих ступеней части высокого давления, а также ступеней после промежуточного перегрева; язвенная коррозия; коррозионное растрескивание под напряжением и коррозионно-усталостные повреждения дисков и рабочих лопаток. Абразивный износ является следствием воздействия твердых частиц — продуктов коррозии поверхностей нагрева, выносимых паровым потоком из котла [6].

Лопатки последних ступеней цилиндров низкого давления работают в среде влажного пара при высоких окружных скоростях и подвергаются интенсивному каплеударному воздействию, которое вызывает их эрозионный износ на значительную глубину, что приводит к снижению КПД ступени и может явиться причиной их усталостных разрушений. Трудно назвать более тяжело нагруженный при эксплуатации элемент конструкции. Для повышения их ресурса применяют припайку стеллитовых пластин, закалку ТВЧ, электроискровое легирование сплавом Т15К6. Однако технологические методы восстановления и упрочнения кромок рабочих лопаток приводят к снижению усталостной прочности (электроискровое легирование и напайка снижают предел выносливости в 4 раза, ТВЧ и лазер — на 15 %. Высокие показатели достигаются после напайки в аргоне [11]).

Известны также затруднения, связанные с вспомогательным оборудованием. При использовании березовского угля из-за износа рабочих лопаток мельниц-вентиляторов типа МВ возникают ограничения нагрузки блока на 10—15 % в связи с недостаточной размольной производительностью мельниц. По указанной и ряду других причин в ходе эксплуатации котлов П-67 при близкой к номинальной нагрузке проектная температура газов на выходе из топки превышалась более чем на 100 °С. Несмотря на модернизацию и многочисленные мероприятия, в 2000 г. энергоблоки были перемаркированы на 700 МВт [2]. Пример является показательным.

Анализ состояния вопроса показывает, что в целом на тепловых электростанциях разного вида по-

¹ Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты 05-08-18027, 08.08.00048).

вреждениям чаще всего подвергаются детали топливного и золотого тракта, паровых турбин, детали проточной части питательных насосов, уплотнительные элементы регулирующей и запорной арматуры. Особенно серьезные и массовые случаи эрозионных повреждений наблюдаются на оборудовании теплоэнергетических установок высокого и сверхвысокого давлений.

Таким образом, проблема снижения ремонтных и эксплуатационных издержек, связанных с сокращением числа и длительности вынужденных остановов, приобретает особую значимость. Поэтому изыскание и разработка высокопроизводительных, эффективных методов и технологических процессов упрочнения и восстановления является актуальной задачей. Решение этих проблем традиционно считается сложным, так как требует проведения целого комплекса мероприятий, а также усовершенствования конструкций, технологии изготовления и режима эксплуатации оборудования.

Применение процессов упрочнения и защиты поверхностей деталей повышает их работоспособность при названных условиях и видах изнашивания, а также при самых разнообразных их сочетаниях. Известные методы поверхностного упрочнения (химическое и гальваническое осаждение, диффузионное насыщение, электроискровое легирование, газотермическое напыление и различные способы наплавки разнообразными материалами) рекомендуются или находят применение в отрасли [6—12].

При выборе способа упрочнения или восстановления необходимо тщательно проанализировать условия эксплуатации конкретного оборудования и определить преимущественный вид изнашивания или их совокупность, а также допустимый предел изменения геометрических размеров, после чего выбирать материал покрытия с высокими показателями служебных свойств и способ его нанесения. Разумеется, такой анализ проводят с учетом технических возможностей и технологичности способа при обязательном сравнении с альтернативными методами по экономическим показателям. В ряде случаев на принятие решения может оказать влияние перспектива использования технологии для других деталей имеющегося оборудования. Отмеченное обстоятельство является общим для различных отраслей машиностроительной промышленности и народного хозяйства, когда возникает проблема увеличения срока службы уже на стадии проектирования и изготовления нового изделия или его реновации при плановом ремонте в процессе последующей эксплуатации. Очевидно, эти задачи следует решать комплексно.

Хотя анализ условий эксплуатации и номенклатуры быстроизнашивающихся деталей основного и вспомогательного оборудования требует отдельного обсуждения, отметим, что для большинства из

них по ряду причин не применимы тонкие микронные покрытия, получаемые путем насыщения или осаждения [9, 10]. При значительных экономических и технологических затратах (дорогостоящее оборудование с низкой производительностью, энергоемкость и продолжительность процесса во времени) эти покрытия могут повысить износостойкость по крайней мере на начальном этапе приработки, однако не обеспечивают защиту от износа при больших его линейных размерах, особенно в условиях интенсивного абразивного и эрозионного изнашивания, даже без частых теплосмен.

Высокие показатели долговечности в рассматриваемых условиях изнашивания и нагружения обеспечивают твердые сплавы на основе кобальта и никеля. Общеизвестным способом нанесения этих многоцелевых материалов, поставляемых в основном в виде прутков и порошков, является способ плазменной наплавки (ПН) [12—20] и газотермического напыления (ГТН) [22—29]. Преимущества ПН по сравнению с другими способами известны и заключаются в высоких производительности и качестве формируемого валика, она позволяет получать заданный состав уже в первом слое. Вследствие малого проплавления и теплового воздействия на подложку при ПН остаточные напряжения растяжения в слое значительно меньше, что сказывается на стойкости против коррозионного растрескивания и значительно уменьшает коробление. ПН никелевыми порошками уже применяют в энергетическом арматуростроении при изготовлении уплотнительных элементов (седел и шиберов) задвижек [12].

В качестве примера на рис. 1 приведены характеристики стойкости различных покрытий и сталей против гидроабразивного изнашивания, полученных по методу М. М. Тененбаума на машине ПВ-12 [21]. Образцы размером $30 \times 20 \times 4$ испытывали при скорости струи 28 м/с, концентрации кварцевых

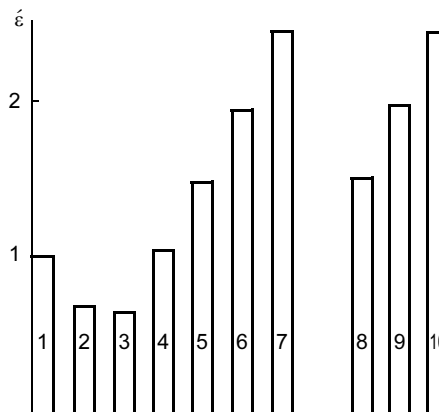


Рис. 1. Сравнение относительной износостойкости различных покрытий: 1 — закаленная сталь 45; 2 — химический никель; 3 — сталь 12X18H10T; 4 — диффузионный хром; 5—7 — соответственно наплавки ПГ-СР2, ПГ-СР3 и ПГ-СР4; 8—10 — то же, после отпуска в течение 2 ч при 500—650 °С (испытания на гидроабразивное изнашивание по М. М. Тененбауму на машине ПВ-12)

частиц 5 г/л фракцией 200—400 мкм, угле атаки 30°. Относительную износостойкость ε определяли по потере массы образца в течение 20 мин. Для сравнения в паре с образцом испытывали образец-эталон из закаленной стали 45 (45—50 HRC). Сопоставление полученных данных позволяет заключить, что наплавленные самофлюсующиеся порошки системы Ni—Cr—Si—B—C превосходят широко распространенные стали и покрытия (см. рис. 1). Отметим, что в этих испытаниях тонкие покрытия, например, из химического никеля или пиролитического хрома хрупко разрушались даже при однократном воздействии частиц, о чем свидетельствует наличие локальных отслаиваний вокруг лунок при случайных попадании абразива вне зоны непосредственного воздействия струи. Наплавленные слои отличаются равномерным износом без заметных следов локализации разрушения, причем износостойкость не зависит от их толщины, числа слоев и термической обработки; она, как правило, повышается с увеличением твердости исходных порошков (рис. 2). Наблюдаемый разброс этого показателя связан с особенностями структуры и расположения в ней упрочняющих карбидных и карбоборидных фаз. Следовательно, наплавленные порошки обеспечивают получение поверхностных слоев, стойких против гидроабразивного изнашивания, характеризуемых высокими показателями задиростойкости при значительных контактных давлениях при нормальной и повышенных температурах [12, 14, 17]; они отличаются коррозионной стойкостью в различных средах и стойкостью против коррозионного растрескивания [21] (в этой работе рассмотрены характерные примеры эксплуатационных повреждений уплотнительной поверхности арматуры в аналогичных условиях изнашивания). Приведенные данные получены при испытаниях однослойных покрытий толщиной не более 2 мм, когда неизбежно разбавление наплавки металлом подложки.

Новые возможности расширения номенклатуры трудносвариваемых сталей и сплавов с неблагоприятным сочетанием теплофизических свойств (например, сталь Гатфильда отличается низкой теплопроводностью и высоким температурным коэффици-

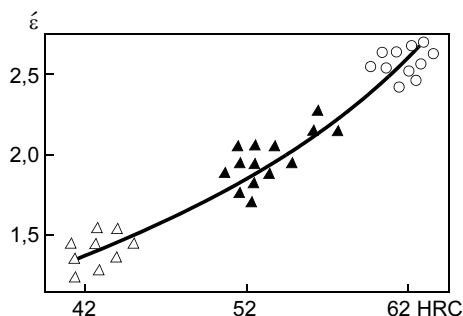


Рис. 2. Зависимость относительной износостойкости наплавленных слоев от твердости: Δ , $\blacktriangle$, $\circ$ — наплавки ПГ-СР2; ПГ-СР3; ПГ-СР4 (CHGN) соответственно

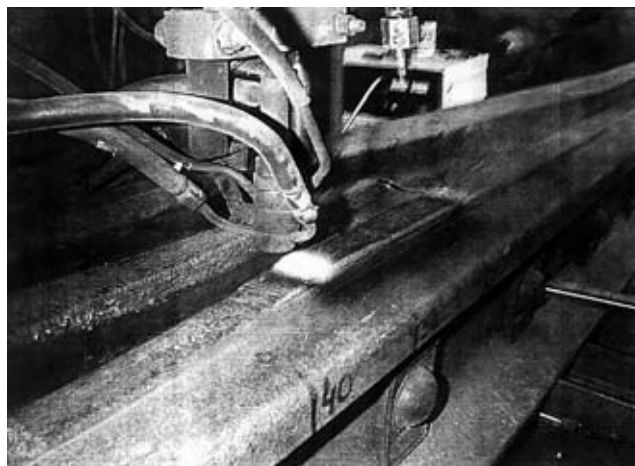


Рис. 3. Восстановление железнодорожных крестовин с помощью плазменной наплавки на установке ОИВТ РАН

ентом линейного расширения) открывает способ ПН с релаксационной обработкой наплавленного слоя, совмещенной с процессом наплавки [16, 18, 19]. Для реализации этого технологического процесса в ОИВТ РАН создана специальная установка [16], с помощью которой ресурс восстановленных, например, железнодорожных крестовин повышается в 1,5—2,0 раза, что принципиально нельзя осуществить другими известными методами (рис. 3).

Таким образом, важные задачи обеспечения работоспособности и эксплуатационной надежности многих тяжелонагруженных узлов энергетического оборудования позволяет решить способ ПН, который непрерывно развивается и совершенствуется, причем оснащение соответствующих производственных участков отечественными установками (УПН-303) с необходимыми дополнительными средствами визуализации и диагностики для автоматического управления технологическим процессом на современном этапе не вызывает принципиальных трудностей. При решении конкретных практических вопросов может оказаться целесообразным применение специализированного оборудования, опыт создания которого накоплен в ОИВТ РАН. Ясно, что рассмотренными примерами не ограничиваются технологические возможности ПН, которые более широки и многообразны для указанных условий эксплуатации и изнашивания.

Напыление покрытий как процесс поверхностной обработки материалов отличается своеобразием и широтой применения. Среди различных технологий напыления неоспоримые преимущества имеет плазменный способ, который используется уже в течение нескольких десятилетий. ГТН позволяет наносить покрытия из всех известных материалов на изделия широкого назначения [22—27]. Особый интерес может представлять разработка покрытий для защиты от высокотемпературного износа и эрозии. Достигнуты серьезные успехи в технологии нанесения и

градиентных термобарьерных покрытий на сопла и лопатки ГТД [23].

Для этих целей создано отечественное (УПУ, УМП, "Киев-7" и др.) и зарубежное оборудование ("Метко", "Плазматехник АГ" и др.), которое подробно описано в литературе [24—27] и не нуждается в детальном обсуждении.

Свойства газотермических покрытий (ГТП) в значительной мере зависят от внутренних, присущих собственно процессу ГТН, и внешних (материал и температура подогрева подложки, виброобработка для снятия остаточных напряжений и повышения прочностных характеристик, обработка искровыми и дуговыми разрядами для очистки их от оксидов и загрязнений, напыление в контролируемой атмосфере и динамическом вакууме и др.) факторов. По названным мероприятиям накоплен обширный фактический материал, используемый во многих отраслях.

ГТП характеризуются сравнительно невысокой прочностью сцепления [22, 24—26]. Поэтому большинство указанных факторов в основном направлены на повышение этой характеристики для расширения номенклатуры изделий, приблизив таким образом по свойствам ГТП к плазменным. Определяющим условием получения высококачественных покрытий является повышение скорости и температуры частиц [25, 27].

Получение плотных покрытий из частиц малого диаметра стало возможным в среде с пониженным давлением. В этом случае разреженные струи плазмы оказывают меньшее воздействие на процессы насыщения напыляемых частиц газами и их окисление. Процесс плазменного распыления материалов в камерах с пониженным давлением получил название "Плазменное нанесение покрытий в динамическом вакууме" [26].

Разреженные струи плазмы оказывают меньшее воздействие на процессы насыщения напыляемых частиц газами и их окисление, что повышает и пластичность покрытий. Особая эффективность этого технологического процесса проявляется при нанесении покрытий из тугоплавких (вольфрама, молибдена) или легкоокисляющихся (титана, циркония и др.) металлов. Напыление титана и тантала в условиях динамического вакуума позволяет получать покрытия с высокой коррозионной стойкостью, которые уже успешно применяются на теплообменниках, работающих в морской воде. Наиболее существенным объектом практического применения рассматриваемого способа являются лопатки газовых турбин с покрытиями из никелевых и кобальтовых сплавов, которые успешно конкурируют с другими покрытиями [23].

С разработкой ОИВТ РАН плазматрона с расширяющимся каналом выходного электрода [16, 28, 29] открылись новые возможности и перспективы для применения способа в различных областях. Система подачи порошка в дугу плазматрона через аксиальное

отверстие в катоде позволяет с большей эффективностью осуществлять нагрев порошка во всем диапазоне изменения энергетических параметров дуги. При этом наблюдается существенное повышение качества и основных служебных свойств покрытий за счет увеличения времени пребывания порошка в плазменной струе, в результате чего частицы имеют на выходе из плазматрона более высокие скорости и температуру.

Термическое упрочнение металлов и сплавов плазменными струями основано на локальном нагреве поверхности дугой с последующим охлаждением этого участка со сверхкритической скоростью в результате отвода теплоты во внутренние слои металла. При взаимодействии плазменной струи с углеродистыми сталями обнаруживаются особенности, заключающиеся в высоких скоростях нагрева и охлаждения, малой продолжительности пребывания обрабатываемого материала при температурах выше критических, одновременной возможности реализации химико-термической обработки. Эти преимущества плазменного воздействия нашли широкое применение в различных отраслях промышленности и народного хозяйства [28—35]. Многолетний опыт, накопленный в ОИВТ РАН при широком промышленном применении разработок в области технологии и создания оборудования для этих целей, свидетельствует, что использование плазменного нагрева для упрочнения эффективно для крупногабаритных деталей и узлов, когда требуется значительная плотность тепловых потоков. Ежемесячными замерами в течение нескольких лет на Московской железной дороге бандажей локомотивных колесных пар после упрочнения этим способом установлено повышение в 1,7—2,5 раза ресурса колесных пар [30].

По глубине упрочненного слоя, его микротвердости и износостойкости плазменное упрочнение сопоставимо с лазерной обработкой, а по производительности технологического процесса и экономическим показателям значительно его превосходит.

В условиях эксплуатации оборудования отрасли в целом многие его детали и узлы работают в жестких условиях контактирования с различными агрессивными средами и абразивными веществами, вызывающими коррозию или износ поверхности. По мере повышения интенсификации эксплуатации оборудования, увеличения его производительности условия работы узлов и деталей становятся все более жесткими. В связи с этим возникает необходимость применения специальных мер, обеспечивающих радикальное повышение жаропрочности, коррозионной стойкости, износостойкости и др. Эта задача может быть успешно решена применением плазменных технологических процессов как способов поверхностного упрочнения и защиты материалов. Современные достижения в разработке и совершенствовании оборудования позволяют зна-

чительно улучшить эксплуатационные характеристики наносимых покрытий, что особенно важно в условиях экономии сырья и эффективного использования энергии. Следует также признать, что рассматриваемые в настоящей работе плазменные технологии не нашли еще должного применения в теплоэнергетике как при изготовлении нового, так и при плановом восстановительном ремонте основного и вспомогательного оборудования.

ВЫВОД

Технологические процессы, основанные на использовании в качестве рабочего инструмента плазменной струи, позволяют решать многие практические задачи увеличения срока службы как при изготовлении новых быстроизнашивающихся деталей и узлов основного и вспомогательного оборудования, так и при восстановлении изношенных с высокими экономическими показателями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Энергетика России: проблемы и перспективы* / Под ред. В. Е. Фортова, Ю. Г. Леонова. М.: Наука, 2006. 499 с.
2. Белый В. В., Порозов С. В., Васильев В. В. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт // *Теплофизика и аэромеханика*. 2007. Т. 14. № 2. С. 299—312.
3. Земцов А. С. Разработка программы обновления основного оборудования ТЭС РАО "ЕЭС России" на период до 2010 г. // *Теплоэнергетика*. 2004. № 9. С. 2—7.
4. Бушуев В. В., Троицкий А. А. Энергетическая стратегия России и экономика страны // *Теплоэнергетика*. 2004. № 1. С. 21—27.
5. Андришин А. В., Полушкин Е. Н., Шныров Е. Ю. Стратегия развития энергоремонтной компании в условиях конкурентного рынка // *Теплоэнергетика*. 2006. № 10. С. 2—6.
6. Ермолаев В. В. Деятельность и перспективы развития энергоремонтной корпорации ОАО "Теплоэнергосервис-ЭК" на российском рынке энергомашиностроения // *Теплоэнергетика*. 2007. № 4. С. 2—3.
7. Опыт повышения надежности и износостойкости элементов проточной части паровых турбин / А. И. Шкляр, Л. А. Жученко, В. В. Ермолаев и др. // *Теплоэнергетика*. 2007. № 4. С. 4—7.
8. Антикайн П. А. Обеспечение надежной эксплуатации котлов, сосудов и трубопроводов после истечения проектного срока службы // *Теплоэнергетика*. 1996. № 12. С. 2—7.
9. Исследование перспективных защитных покрытий для лопаток последних ступеней паровых турбин / В. Ф. Резинских, А. Ф. Богачев, А. И. Лебедева и др. // *Теплоэнергетика*. 1996. № 12. С. 28—31.
10. Рыженков В. А. Состояние проблемы и пути повышения износостойкости энергетического оборудования // *Теплоэнергетика*. 2006. № 6. С. 20—25.
11. Романов В. Н., Федосов А. И. Влияние условий нагружения на процесс эрозионного разрушения // *Энергомашиностроение*. 1984. № 6. С. 24—27.
12. Гладкий П. В., Переpletчиков Е. Ф., Рабинович В. И. Плазменная наплавка в энергетическом арматуростроении. М.: НИИинформтяжмаш, 1970. 35 с.
13. *Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением* / Под ред. Б. Е. Патона. М.: Машиностроение, 1974. 768 с.
14. *Наплавка деталей затворов фонтанной арматуры* / В. Б. Мордынский, В. П. Барсуков, Э. С. Комарчева и др. // *Химическое и нефтяное машиностроение*. 1986. № 11. С. 35—36.
15. *Ремонт крестовин наплавкой при помощи плазмы* / Э. Х. Исакаев, А. Э. Яблонский, А. Г. Коган и др. // *Вестник ВНИИЖТ*. 1999. № 5. С. 18—20.
16. *Установка плазменного восстановления железнодорожных крестовин* / Л. Е. Алексеева, Г. А. Желобцова, В. А. Иевский и др. // *Сб. докл. 1-й конференции по инновационной деятельности*. М.: ОИВТ РАН, 2005. С. 69—72.
17. *Плазменная наплавка на медь и проблема повышения ресурса медных кристаллизаторов* / Л. Е. Алексеева, М. В. Ильичев, Э. Х. Исакаев и др. // *Сб. докладов 1-й конференции по инновационной деятельности*. М.: ОИВТ РАН, 2005. С. 166—170.
18. *Эффективный метод увеличения срока службы железнодорожных крестовин путем плазменной наплавки* / Э. Х. Исакаев, М. В. Ильичев, А. Л. Очкань, Г. А. Филиппов // *Технология металлов*. 2003. № 7. С. 29—34.
19. *Повышение износостойкости стали 110Г13Л плазменной наплавкой* / Э. Х. Исакаев, М. В. Ильичев, А. С. Тюфтяев и др. // *Сталь*. 2007. № 12. С. 70—74.
20. Тененбаум М. М. Гидроабразивная износостойкость материалов // *Трение и износ*. 1982. Т. 3. № 1. С. 77—83.
21. Исакаев Э. Х., Мордынский В. Б. Стойкость наплавленных самофлюсующихся сплавов против коррозионного растрескивания в сероводородсодержащих средах // *Сварочное производство*. 2008. № 5. С. 3—7.
22. Борисов Ю. С., Харламов Ю. А., Сидоренко С. Л. Газопорошковые покрытия из порошковых материалов: Справочник. Киев: Наукова думка, 1987. 544 с.
23. Ющенко К. А., Борисов Ю. С. Газотермическое нанесение покрытий: современные достижения и перспективы развития // *Газотермическое напыление в промышленности СССР и за рубежом*. Л.: ЛДНТП, 1991. С. 8—11.
24. Хасуй А., Мориак О. Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
25. *Газотермическое напыление* / Под ред. Л. Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.
26. Кудинов В. В., Бобров Г. В. Нанесение покрытий напылением. Теория, технология, оборудование. М.: Металлургия, 1992. 432 с.
27. *Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор)* / В. А. Фролов, В. А. Поклад, Б. В. Рябенко и др. // *Сварочное производство*. 2006. № 11. С. 38—47.
28. Влияние угла раскрытия канала выходного электрода на характеристики плазматрона / Э. Х. Исакаев, Р. Р. Григорьянц, Н. О. Спектор, А. С. Тюфтяев // *ТВТ*. 1994. Т. 32. № 4. С. 627—636.
29. *Плазматрон с расширяющимся каналом выходного электрода* / П. П. Иванов, Э. Х. Исакаев, А. В. Карпунин и др. // *ТВТ*. 1994. Т. 32. № 4. С. 51—57.
30. *Использование баз данных подвижного состава для анализа влияния упрочнения железнодорожных колесных пар на их ресурс* / С. В. Антиповский, О. С. Вайнштейн, П. П. Иванов и др. // *ТВТ*. 1994. Т. 32. № 4. С. 42—50.
31. *Установка плазменного упрочнения гребней железнодорожных колес* / Т. Н. Барина, В. Ф. Грошев, В. А. Иевский и др. // *ТВТ*. 1994. Т. 32. № 4. С. 58—62.
32. *Плазменное упрочнение гребней (реборд) колесных пар трамваев* / Б. М. Антонов, М. В. Ильичев, В. Э. Исакаев и др. // *ТВТ*. 1994. Т. 32. № 4. С. 78—80.
33. Влияние плазменного упрочнения на ресурс металлургического оборудования / Г. А. Желобцова, М. В. Ильичев, Э. Х. Исакаев и др. // *Черная металлургия*. 2006. № 3. С. 51—52.
34. Влияние плазменно-дуговой обработки на структурные превращения и поверхностное упрочнение углеродистых и легированных сталей / Д. С. Ставров, Л. М. Капуткина, С. К. Киров и др. // *МитОМ*. 1996. № 9. С. 16—19.
35. *Особенности структурообразования и формирования свойств при плазменной обработке углеродистой стали* / Э. Х. Исакаев, М. В. Ильичев, А. С. Тюфтяев, Г. А. Филиппов // *Материаловедение*. 2003. № 2. С. 52—55.

С. Г. ДОКШАНИН, канд. техн. наук, И. И. ДОКШАНИНА, аспирант
Сибирский федеральный университет

Моделирование контактных напряжений на поверхности качения с учетом сил трения

Касательные нагрузки, действующие на площадке контакта и зависящие от сил трения, существенно влияют на расчет напряженного состояния. Максимальные касательные напряжения, связанные с увеличением силы трения, повышают нормальные напряжения, что приводит к появлению усталостного изнашивания поверхностей. При этом скорость процесса изнашивания будет зависеть от свойств смазочного материала и толщины смазочной пленки, разделяющей поверхности. Анализ напряженно-деформационного состояния контактирующих тел показывает, что при одновременном действии касательных и нормальных нагрузок наиболее значимыми для определения долговечности подшипников качения по критерию усталостного изнашивания являются не глубинные максимальные касательные напряжения, а поверхностные напряжения на контуре контакта, непосредственно связанные с силами трения. Установление степени влияния этих сил на усталостные процессы позволило бы разработать меры для повышения срока службы опор качения, работающих при значительных касательных нагрузках.

Данная работа является частью комплекса лабораторных исследований, связанных с повышением долговечности опор качения за счет применения в них смазочных материалов с добавками ультрадисперсного алмазографита. Эти добавки характеризуются высокой адгезионной способностью к металлическим поверхностям, вследствие чего слой смазочного материала прочно удерживается на поверхности трения, создавая за-

щитный экран и воспринимая на себя основную долю касательной нагрузки. Снижение силы трения на контакте будет менять форму образования усталостных трещин на глубинное, что увеличивает время эксплуатации подшипников опор до начала усталостного разрушения дорожек и тел качения подшипников. Применение смазочных материалов с такими антифрикционными свойствами в подшипниках качения способствует уменьшению трения и износа поверхностей, отводу выделяемой теплоты и защите поверхностей от коррозии.

Для разработки компьютерной модели контакта ролика с дорожкой качения использовали программный пакет ELCUT, позволяющий решать задачи теории упругости в постановках плоских напряжений, плоских деформаций и осесимметричного напряженного состояния с изотропными или ортотропными свойствами материалов.

Рассматривали контакт, возникающий во время качения с проскальзыванием ролика по упругому основанию. Базируясь на положениях герцевской и упругогидродинамической теории контакта, а также учитывая условия работы роликовых подшипников качения для различных узлов, рассматривали задачу о контакте тел качения в роликовом подшипнике для режима граничного трения. Контактные поверхности задавали между роликом и поверхностью качения внутреннего кольца. В зоне контакта имеется герцевская площадка прямоугольной формы шириной $2b$ и длиной l , равной длине ролика, образованная упругими деформациями (рис. 1) и состоящая из двух участков. Участок II, расположенный на стороне набегания цилиндра, является зоной сцепления, а участок I — зоной, где имеет место проскальзывание контактирующих поверхностей. Координату точки c , разделяющей эти две зоны, определяли по формуле [1]

$$c = b \left(1 - \frac{1}{\pi} \arctg \frac{1 - 2\nu}{f(2 - 2\nu)} \right),$$

где b — полуширина площадки контакта, определенной по формулам Герца; f — коэффициент трения скольжения; ν — коэффициент Пуассона.

Расчетная схема состоит из двух блоков — ролика и дорожки качения. Каждый блок разбивали на ребра и вершины, к которым прикладывали действующие точечные или поверхностные нагрузки. Значения напряжений в упругом контакте ролика с поверхностью при наличии граничного слоя смазочного материала определяли как вдоль площадки контакта, так и по глубине по центру площадки. Условия, определяющие нагружение площадки контакта между

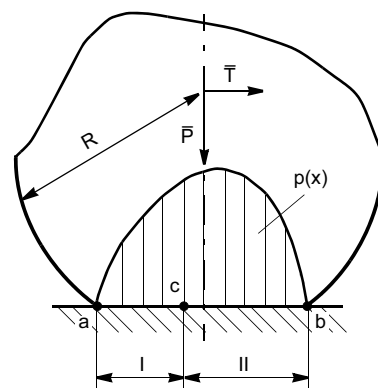


Рис. 1. Схема контакта ролика при качении по упругому основанию

двумя скользящими телами, для такой схемы представлены системой уравнений [2, 3]

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -q(x) = -\frac{q_0}{a} (a^2 - x^2)^{1/2}, \\ \tau_{xz} &= -fq(x), \\ -a &\leq x \leq a, \end{aligned} \right\} z = 0,$$

где a — полуширина площадки контакта; x — расстояние от центра площадки до точки приложения нагрузки; q_0 — давление в центре площадки; τ_{xz} — тангенциальное напряжение на площадке контакта; $q(x)$ — нормальное напряжение.

Значения коэффициентов трения определяли экспериментально при исследовании ультрадисперсных порошков алмазографита в качестве антифрикционных добавок к смазочным материалам и их влияния на силу трения при условии проскальзывания ролика. Исходным и основным расчетным напряжением принимали максимальные касательные напряжения $\tau_{\max}$.

При наличии на участке скольжения силы трения точка, в которой касательные напряжения достигают максимального значения, перемещается к поверхности в направлении действия силы трения. Увеличение сил трения на участке скольжения приводит к перемещению максимальных касательных напряжений к поверхности в направлении действия силы трения, при этом максимальные срезающие напряжения будут располагаться на небольшой глубине или непосредственно на поверхности [4]. На рис. 2 приведены полученные с помощью компьютерной модели поля распределения касательных напряжений по глубине дорожки.

Значения сил трения, соответствующие действующим на поверхности касательным нагрузкам, взяты для коэффициентов трения 0,09 и 0,11. Наименьший коэффициент трения соответствовал скольжению при наличии смазочного материала с добавкой ультрадисперсного алмазографита (УДПАГ). Более темные области, соответствующие максимуму касательных напряжений, с увеличением

коэффициента трения смещаются ближе к поверхности.

Если абсолютный максимум касательных напряжений будет располагаться непосредственно на поверхности или на небольшой глубине под ней, то усталостное разрушение начинается с поверхности трения. Его можно уменьшить при применении смазочных материалов, которые наряду со снижением силы трения модифицируют поверхности трения, снижая контактные нагрузки, а следовательно, и напряжения в материале. Именно такой эффект отмечали при использовании в подшипниках качения смазочных материалов с добавками ультрадисперсного алмазографита.

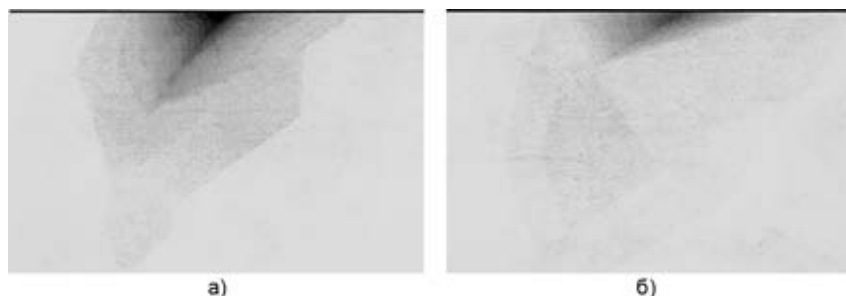


Рис. 2. Поля распределения касательных напряжений по глубине: а, б — коэффициент трения f равен 0,094 и 0,11 соответственно

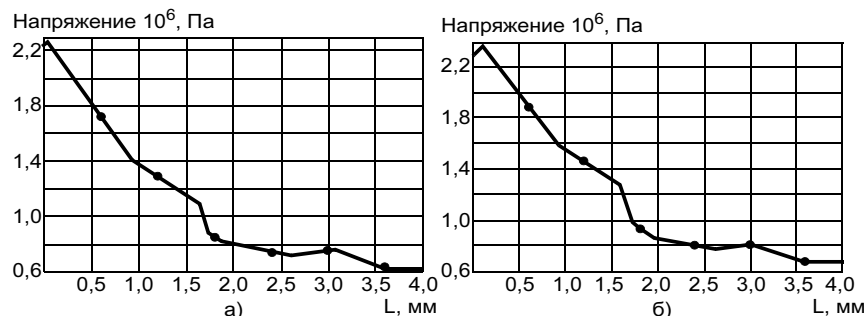


Рис. 3. Распределение касательных напряжений по глубине внутреннего кольца для смазочного материала ЦИАТИМ-201 с добавкой (а) и без добавки (б) УДПАГ

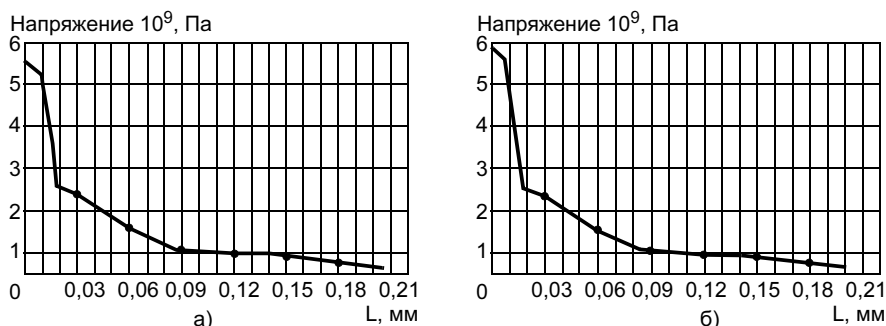


Рис. 4. Распределение нормальных напряжений по глубине внутреннего кольца для смазочного материала Литол-24: а, б — см. рис. 3

ным алмазграфитом снижает поверхностные касательные напряжения на дорожке качения. Анализ результатов моделирования показал, что наличие в зоне контакта пластичной смазки с добавкой УДПАГ снижает нормальное напряжение по сравнению со смазками-основами на 13—15 %.

Таким образом, снижение действующих на площадке контакта сил трения уменьшает поверхно-

стные касательные напряжения на участке проскальзывания площадки контакта, что положительно сказывается на долговечности опор качения. Результаты экспериментальных исследований и эксплуатационных испытаний показали, что применение таких смазочных материалов позволяет увеличить срок службы подшипникового узла в 1,5—2 раза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пинегин С. В. Трение качения в машинах и приборах. М.: Машиностроение, 1976. 264 с.
2. Биргер И. А. Расчет на прочность деталей машин: Справочник. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
3. Горячева И. Г. Механика фрикционного взаимодействия. М.: Наука, 2001. 478 с.
4. Морозов Е. М. Контактные задачи механики разрушения. М.: Машиностроение, 1999. 544 с.

Е. Г. СИНЕНКО, канд. техн. наук, Д. Д. АБАЗИН, инж., О. В. КОНИЩЕВА, канд. техн. наук
Сибирский федеральный университет

Кинематика и динамика зубчатого эксцентричного дифференциала

В различных отраслях промышленности для воспроизведения заданной траектории движения либо для изменения и разложения скоростей вращения применяют соосные дифференциальные механизмы. Известен эксцентричный дифференциал¹, в котором применены сателлиты разных диаметров, вследствие чего оси центральных колес смещаются друг относительно друга на некоторую величину (эксцентриситет e), а выходное звено получает дополнительно сложное вращательно-вращательное движение (см. рисунок). При этом ось водила H может совпадать с осью колеса 3 или с осью колеса 1, а сателлиты имеют различные размеры r_{21} и r_{24} . При анализе кинематики и динамики эксцентричного механизма удобно рассматривать механизм с двумя сателлитами, хотя реально их может быть 3, 4, 5 и 6. Основной задачей исследования эксцентричного механизма является определение траекторий движения отдельных точек сателлитов, колес 3 и 1 и закона движения выходных звеньев φ_H и φ_3 .

Определим положения точек сателлитов и центральных колес (т. А, В, С, D) в неподвижной системе координат. Положение т. А колеса 3 определится следующим образом:

$$R_A = \begin{bmatrix} x_A \\ y_A \\ 1 \end{bmatrix} = T_3 R_3 = \begin{bmatrix} \cos \varphi_3 & -\sin \varphi_3 & 0 \\ \sin \varphi_3 & \cos \varphi_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_3 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_3 \cos \varphi_3 \\ r_3 \sin \varphi_3 \\ 1 \end{bmatrix},$$

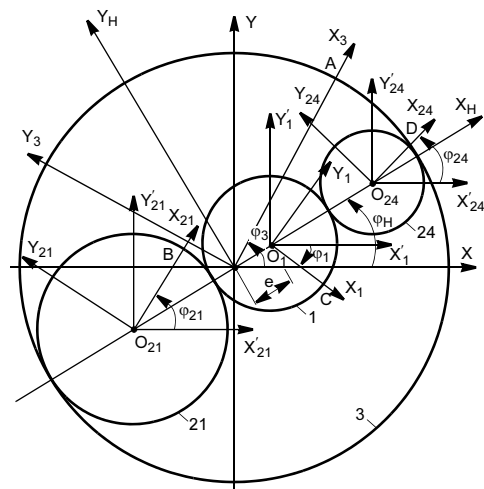
где T_3 — матрица перехода от системы OXY к системе OX_3Y_3 , а координаты т. А равны

$$\begin{cases} x_A = r_3 \cos \varphi_3; \\ y_A = r_3 \sin \varphi_3. \end{cases} \quad (1)$$

Положение т. В сателлита 21:

$$R_B = \begin{bmatrix} x_B \\ y_B \\ 1 \end{bmatrix} = T_{21} R_{21} = \begin{bmatrix} \cos \varphi_{21} & -\sin \varphi_{21} & -(r_3 - r_{21}) \cos \varphi_H \\ \sin \varphi_{21} & \cos \varphi_{21} & -(r_3 - r_{21}) \sin \varphi_H \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{21} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{21} \cos \varphi_{21} - (r_3 - r_{21}) \cos \varphi_H \\ r_{21} \sin \varphi_{21} - (r_3 - r_{21}) \sin \varphi_H \\ 1 \end{bmatrix},$$

где T_{21} — матрица перехода от неподвижной системы координат OXY к подвижной системе $O_1X_{21}Y_{21}$.



Расчетная схема эксцентричного механизма (φ_1, φ_3 — абсолютные углы поворота колес; $\varphi_{21}, \varphi_{24}$ — то же, сателлитов; φ_H — угол поворота водила)

¹ Патент 2153612 (РФ).

В результате координаты т. В

$$\begin{cases} x_B = r_{21}\cos\varphi_{21} - (r_3 - r_{21})\cos\varphi_H; \\ y_B = r_{21}\sin\varphi_{21} - (r_3 - r_{21})\sin\varphi_H. \end{cases} \quad (2)$$

Положение т. С колеса 1:

$$R_C = \begin{bmatrix} x_C \\ y_C \\ 1 \end{bmatrix} = T_1 R_1 = \begin{bmatrix} \cos\varphi_1 & -\sin\varphi_1 & e\cos\varphi_H \\ \sin\varphi_1 & \cos\varphi_1 & e\sin\varphi_H \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} r_1\cos\varphi_1 + e\cos\varphi_H \\ r_1\sin\varphi_1 + e\sin\varphi_H \\ 1 \end{bmatrix},$$

где T_1 — матрица перехода от неподвижной системы координат OXY к системе $O_1X_1Y_1$.

В результате умножения на матрицу перехода получаем координаты т. С:

$$\begin{cases} x_C = r_1\cos\varphi_1 + e\cos\varphi_H; \\ y_C = r_1\sin\varphi_1 + e\sin\varphi_H, \end{cases} \quad (3)$$

где $e = r_3 - 2r_{24} - r_1$.

Положение т. D:

$$R_D = \begin{bmatrix} x_D \\ y_D \\ 1 \end{bmatrix} = T_{24} R_{24} =$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\varphi_{24} & -\sin\varphi_{24} & (r_3 - r_{24})\cos\varphi_H \\ \sin\varphi_{24} & \cos\varphi_{24} & (r_3 - r_{24})\sin\varphi_H \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{24} \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} r_{24}\cos\varphi_{24} + (r_3 - r_{24})\cos\varphi_H \\ r_{24}\sin\varphi_{24} + (r_3 - r_{24})\sin\varphi_H \\ 1 \end{bmatrix},$$

тогда координаты т. D:

$$\begin{cases} x_D = r_{24}\cos\varphi_{24} + (r_3 - r_{24})\cos\varphi_H, \\ y_D = r_{24}\sin\varphi_{24} + (r_3 - r_{24})\sin\varphi_H, \end{cases} \quad (4)$$

где $\varphi_{24} = a_{24}\varphi_3 + b_{24}\varphi_H$; $a_{24} = r_3/r_{24}$; $b_{24} = (1 - a_{24})$.

Для механизмов с несколькими степенями свободы при голономных связях уравнения движения составляют в форме уравнений Лагранжа второго рода, когда силы упругости, силы тяжести и другие, зависящие только от обобщенных координат, учитывают через изменение потенциальной энергии системы:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{q}_j} \right) - \frac{\partial K}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = Q_j, \quad (5)$$

где $j = 1, 2$; $q_1 = \varphi_H$; $q_2 = \varphi_3$; $\dot{q}_1 = \dot{\varphi}_H$; $\dot{q}_2 = \dot{\varphi}_3$; K — кинетическая энергия механизма; Π — потенциальная энергия механизма; j — число обобщенных координат; q_j — обобщенные координаты; Q_j — обобщенные силы.

Кинетическую энергию колеса 3 определим по формуле

$$K_3 = \frac{1}{2} J_z^{(3)} \dot{\varphi}_3^2. \quad (6)$$

Кинетическая энергия сателлита 21

$$K_{21} = \frac{1}{2} (J_z^{(21)} \dot{\varphi}_{21}^2 + m_{21}(r_3 - r_{21})^2 \dot{\varphi}_H^2), \quad (7)$$

где $\dot{\varphi}_{21} = a_{21}\dot{\varphi}_3 + b_{21}\dot{\varphi}_H$; $a_{21} = \frac{r_3}{r_{21}}$; $b_{21} = (1 - a_{21})$;

$\varphi_{21} = a_{21}\varphi_3 + b_{21}\varphi_H$.

Кинетическая энергия колеса 1

$$K_1 = \frac{1}{2} J_z^{(1)} \dot{\varphi}_1^2 + m_1 e^2 \dot{\varphi}_H^2, \quad (8)$$

где $\dot{\varphi}_1 = a_1\dot{\varphi}_3 + b_1\dot{\varphi}_H$; $a_1 = -\frac{r_3}{r_1}$; $b_1 = \left(1 + \frac{r_3}{r_1}\right)$.

Кинетическая энергия сателлита r_{24}

$$K_{24} = \frac{1}{2} (J_z^{(24)} \dot{\varphi}_{24}^2 + m_{24}(r_3 - r_{24})^2 \dot{\varphi}_H^2), \quad (9)$$

где $\dot{\varphi}_{24} = a_{24}\dot{\varphi}_3 + b_{24}\dot{\varphi}_H$.

Кинетическая энергия водила H

$$K_H = \frac{1}{2} J_z^{(H)} \dot{\varphi}_H^2. \quad (10)$$

Полная кинетическая энергия механизма

$$K = \sum K_i = \frac{1}{2} (J_z^{(3)} \dot{\varphi}_3^2 + J_z^{(1)} \dot{\varphi}_1^2 + m_1 e^2 \dot{\varphi}_H^2 + J_z^{(H)} \dot{\varphi}_H^2 +$$

$$+ J_z^{(21)} \dot{\varphi}_{21}^2 + m_{21}(r_3 - r_{21})^2 \dot{\varphi}_H^2 + J_z^{(24)} \dot{\varphi}_{24}^2 +$$

$$+ m_{24}(r_3 - r_{24})^2 \dot{\varphi}_H^2) = \frac{1}{2} (\dot{\varphi}_3^2 (J_z^{(3)} + J_z^{(21)} a_{21}^2 + J_z^{(1)} a_1^2 +$$

$$+ J_z^{(24)} a_{24}^2) + 2\dot{\varphi}_3 \dot{\varphi}_H (J_z^{(21)} a_{21} b_{21} + J_z^{(1)} a_1 b_1 +$$

$$+ J_z^{(24)} a_{24} b_{24}) + \dot{\varphi}_H^2 (J_z^{(H)} + c_{24} + J_z^{(24)} b_{24}^2 + c_1 +$$

$$+ J_z^{(1)} b_1^2 + c_{21} + J_z^{(21)} b_{21}^2)).$$

После преобразования получим

$$K = A \dot{\varphi}_3^2 + B \dot{\varphi}_3 \dot{\varphi}_H + C \dot{\varphi}_H^2, \quad (11)$$

где A, B, C — инерционные коэффициенты, не зависящие от углов поворота φ_1 и φ_H .

Потенциальная энергия колеса 3 $\Pi_3 = 0$; потенциальная энергия сателлитов 21 и 24:

$$\Pi_{21} = -m_{21}g(r_3 - r_{21})\sin\varphi_H = -P_{21}(r_3 - r_{21})\sin\varphi_H; \quad (12)$$

$$\Pi_{24} = m_{24}g(r_3 - r_{24})\sin\varphi_H = P_{24}(r_3 - r_{24})\sin\varphi_H, \quad (13)$$

где P_{21}, P_{24} — вес сателлитов; g — ускорение свободного падения.

Потенциальная энергия колеса 1 и водила H

$$\Pi_1 = m_1 g e \sin\varphi_H = P_1 e \sin\varphi_H, \quad (14)$$

$$\Pi_H = P_H \frac{r_{21} - r_{24}}{2} \sin\varphi_H. \quad (15)$$

Полная потенциальная энергия механизма

$$\begin{aligned} \Pi &= \sum \Pi_i = \Pi_{21} + \Pi_1 + \Pi_{24} + \Pi_H + \Pi_3 = \\ &= -P_{21}(r_3 - r_{21})\sin\varphi_H + P_1 e \sin\varphi_H + P_{24}(r_3 - r_{24})\sin\varphi_H + \\ &= P_H \frac{r_{21} - r_{24}}{2} \sin\varphi_H + 0 = \left(-P_{21}(r_3 - r_{21}) + P_1 e + \right. \\ &\quad \left. + P_{24}(r_3 - r_{24}) + P_H \frac{r_{21} - r_{24}}{2} \right) \sin\varphi_H \end{aligned}$$

или

$$\Pi = D \sin\varphi_H, \quad (16)$$

$$\text{где } D = -P_{21}(r_3 - r_{21}) + P_1 e + P_{24}(r_3 - r_{24}) + P_H \frac{r_{21} - r_{24}}{2}.$$

Найдем частные производные

$$\begin{aligned} \frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_H} &= \frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_3} = 0; \\ \begin{cases} \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_1} = \frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_H} = B\dot{\varphi}_3 + 2C\dot{\varphi}_H; \\ \frac{\partial K}{\partial \dot{q}_2} = \frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_3} = 2A\dot{\varphi}_3 + B\dot{\varphi}_H. \end{cases} \quad (17) \end{aligned}$$

Дифференцируя выражения (17) по времени, получим

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_H} \right) = B\ddot{\varphi}_3 + 2C\ddot{\varphi}_H; \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial K}{\partial \dot{\varphi}_3} \right) = 2A\ddot{\varphi}_3 + B\ddot{\varphi}_H. \end{cases} \quad (18)$$

Производные потенциальной энергии

$$\begin{cases} \frac{\partial \Pi}{\partial q_1} = \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_H} = D \cos\varphi_H \dot{\varphi}_H; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial q_2} = \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_3} = 0. \end{cases} \quad (19)$$

Обобщенные силы

$$Q_1 = M_H; \quad Q_2 = M_3.$$

Подставляя значения производных (17)–(19) в выражение (5), получим искомые уравнения движения эксцентричного дифференциала

$$\begin{cases} B\ddot{\varphi}_3 + 2C\ddot{\varphi}_H + D \cos\varphi_H = M_H; \\ 2A\ddot{\varphi}_3 + B\ddot{\varphi}_H = M_3. \end{cases} \quad (20)$$

Для планетарного редуктора при $\dot{\varphi}_3 = 0$

$$\begin{cases} 2C\ddot{\varphi}_H + D \dot{\varphi}_H \cos\varphi_H = M_H; \\ B\ddot{\varphi}_H = 0. \end{cases} \quad (21)$$

Система уравнения зубчатого дифференциала (20) и планетарного редуктора (21) может быть также представлена в виде, разрешенном относительно угловых ускорений $\ddot{\varphi}_H$ и $\ddot{\varphi}_3$.

Так как $B \neq 0$, то из выражения (21) получим

$$\begin{aligned} \ddot{\varphi}_H &= 0, \quad \dot{\varphi}_H = \text{const}; \\ M_H &= D \dot{\varphi}_H \cos\varphi_H. \end{aligned} \quad (22)$$

Для обращенного механизма при $\dot{\varphi}_H = 0$ и $M_H = 0$

$$\begin{cases} B\ddot{\varphi}_3 + D = 0; \\ 2A\ddot{\varphi}_3 = M_3. \end{cases}$$

Откуда

$$\ddot{\varphi}_3 = -\frac{D}{B}; \quad M_3 = -\frac{2AD}{B}. \quad (23)$$

Таким образом, для реального эксцентричного механизма при известных параметрах звеньев могут быть определены и учтены при расчете механизма конкретные значения ускорений и моментов на ведомых звеньях.

О. Ф. ВЯЧЕСЛАВОВА, д-р техн. наук, В. Н. ПОТАПОВ, инж., А. В. ИВАНЯЙСКИЙ, д-р техн. наук МГОУ

Применение информационных технологий для контроля параметров поверхности изделия ракетно-космической техники

В настоящее время активно развивается фрактально-синергетический подход к проектированию структурно-информационных технологий [1]. В то же время создаются системы автоматизации и информационные технологии на базе обобщенных энергетических критериев [2].

Повышение требований к качеству изделий РКТ, их технологическим характеристикам и долговечности инициировало создание новых технологий обработки деталей, поставило вопросы прогнозирования и управ-

ления их свойствами. Групповые процессы формирования рельефа поверхности как совокупности нано-объектов, приводящие к образованию кластерных структур (нанесение покрытий), золь-гель процессы, электрохимическая, лазерная, электроэрозионная обработка и т. д. потребовали их адекватного математического описания.

Поэтому для решения задач, связанных с формированием нанообъектов, вводят математические зависимости, описывающие "фрактальные агрегаты"

или "фрактальные кластеры" [3]. Последние обладают свойством самоподобия, что выражается возможностью в окрестности точки выделить область относительно небольшого объема, осуществляя физическое моделирование образуемых нанообъектов. Множества возможных траекторий процесса развития поверхности как кластерной системы должны иметь максимальную вариабельность в произвольный момент времени, при этом наиболее вероятным стохастическим процессом в случае отсутствия ограничений внешней среды будет имеющий в любой момент времени максимальное разнообразие, определяемое максимальной энтропией системы.

Математические модели формирования кластерных систем при обработке деталей РКТ. Созданная информационная система базируется на разработанных математических моделях формирования поверхностей детали, получаемых либо за счет съема обрабатываемого материала (кластеры разрушения), либо за счет наращивания поверхности (клепочный механизм — кластеры роста).

Процесс образования нанообъектов базируется на теории самоорганизации, в соответствии с которой осуществляется перебор различных вариантов математических моделей и их комбинаций (кластер роста; — кластер разрушения; — сочетание в различных соотношениях этих моделей), при постепенном увеличении сложности.

Качественная и количественная оценка кластерной системы, формирующей поверхность деталей, осуществляется на базе комплексного анализа основных характеристик процесса образования кластеров с учетом фрактальной размерности:

$$D = \left[\frac{\ln \langle h(r) \rangle}{\ln r} \right], \quad (1)$$

где r — функция масштабного самоподобия в интервале размеров $R_0 \leq r \leq R$, R_0 — масштабная единица измерения линейного размера R кластера.

К основным характеристикам процесса образования кластеров можно отнести число кластеров, число элементов в одном кластере, распределение кластеров по размерам.

Общее число кластеров в системе представляется индикаторной функцией

$$N_k = \sum j l(t_j^1), \quad (2)$$

где $l(t_j^1)$ — индикатор события, состоящего в появлении j -го кластера.

Математическое ожидание $M_k(t)$ числа кластеров

$$G\{\sum \tau_j^1 \leq t\} = \sum_{j=1}^{\infty} G(j, t). \quad (3)$$

Число элементов в j -м кластере представляется индикаторной функцией

$$N_{e1}(j, t) = \sum i l(t_j^1), \quad (4)$$

где $l(t_j^1)$ — индикатор события, состоящего в появлении i -го элемента в j -м кластере; $\tau_1^1, \tau_2^1, \dots, \tau_j^1$ — длительности случайного интервала до появления j -го кластера единичного размера; $\tau_j^1, \tau_j^2, \dots, \tau_j^j$ — длительности случайного интервала до появления i -го по счету элемента в j -м кластере.

Математическое ожидание $M_{e1}(j, t - t_j^1)$ числа элементов

$$\sum_{j=1}^{\infty} G(i, t - t_j^1), t - t_j^1 \geq 0. \quad (5)$$

Общее число элементов во всех кластерах ко времени t определяется индикаторной функцией

$$M_M(t) = \sum_j \sum_i l(t_j^1), \text{ математическое ожидание } M_M(t)$$

числа элементов равно

$$\sum_{j=1}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} G(i, j, t) = \sum_{i=1}^{\infty} G(i, j=1, t) + \sum_{j=2}^{\infty} \sum_{i=1}^{\infty} G(i, j, t) \quad (6)$$

или

$$M_M(t) = M_{e1}(t) + \int_0^t M_{e1}(t - \tau) dM_k(\tau). \quad (7)$$

При определении распределения кластеров по размерам учитываем, что размер произвольного j -го кластера выражается индикаторной функцией

$$N_{e1}(j, t - t_j^1) = \sum_i l(t_j^i), \quad (8)$$

где $\{t_j^i\}$ — целочисленная временная последовательность событий.

Математическое ожидание числа элементов в первом кластере

$$M_{e1}(j=1, t) = M_{e1}(t) = \sum_{i=1}^{\infty} G(i, j=1, t), \quad (9)$$

а во всех последующих

$$(j > 1) - M_{e1}(j, t) = \sum_{i=1}^{\infty} G(j, t) G(i, t) = \int M_{e1}(t - \tau) dG(j, t). \quad (10)$$

Полученные выражения позволяют изучать статистические свойства множества кластеров $\{N_{e1}(j, t) : j = 1 \div \infty, t > 0\}$ или $\{M_{e1}(j, t) : j = 1 \div \infty, t > 0\}$ в произвольный момент времени t . Это множество представляет собой вариационный ряд кластеров (ранговое распределение), упорядоченных по мере уменьшения их размеров или числа входящих в них элементов.

Если необходимо выявить распределение групп кластеров с одинаковым числом, считается, что число кластеров, в каждом из которых имеется ровно по i элементов, образуют группу размером

$$N_{gr}(i, t) = \sum_j l(t_j^i). \quad (11)$$

При этом суммирование ведется по кластерам с одинаковым числом элементов.

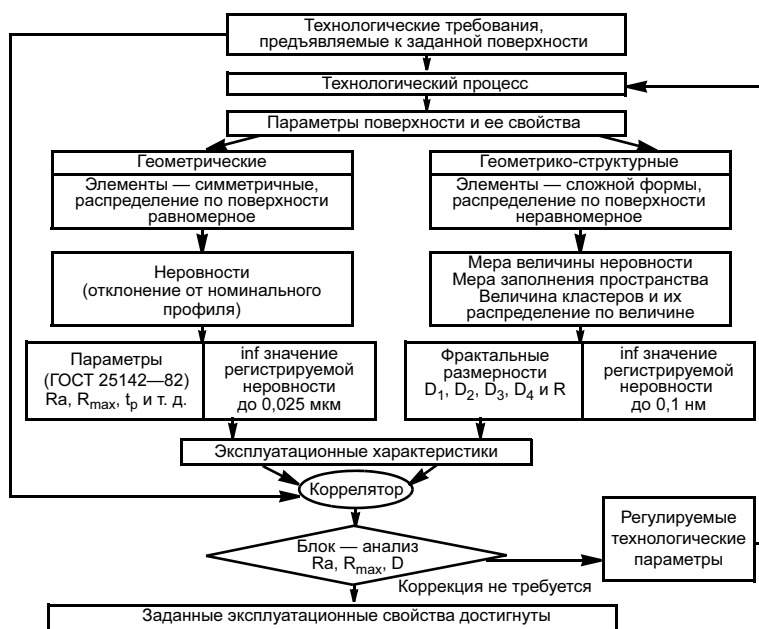


Рис. 1. Схема установления взаимосвязи между эксплуатационными свойствами и технологическими параметрами обработки деталей

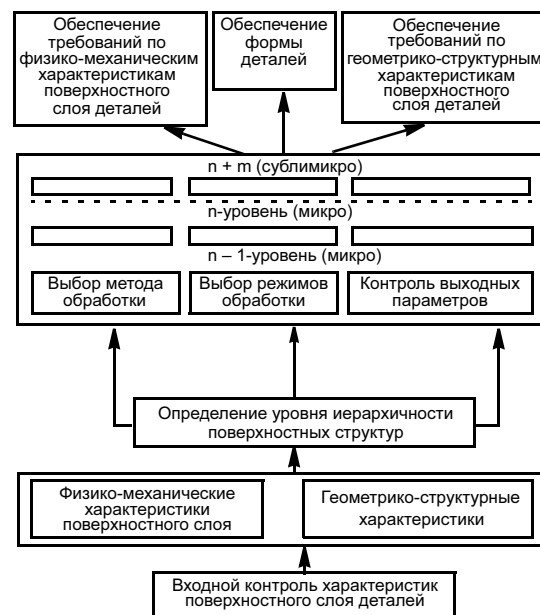


Рис. 2. Дерево целей для обеспечения качества поверхностного слоя деталей РКТ

Математическое ожидание числа кластеров, в каждом из которых имеется ровно по i элементов, представим в виде

$$M_{gr}(i, t)G = \{G(i, j = 1) - G(i + 1, j = 1)\} + \sum_{j=2}^{\infty} \{G(i, j, t) - G(i + 1, j, t)\} = \{G(i, j = 1) - G(i + 1, j = 1)\} + \sum_{j=2}^{\infty} \{G(i, t) - G(i + 1, t)\}G(j, t) = P(i, t) + M_k(t)P(i, t) = P(i, t) + \int_0^t P(i, t - \tau) dM_k(\tau). \quad (12)$$

Определение статистических свойств множества кластеров в моменты времени t_j^i позволяет выявить принципы управления структурой обрабатываемых материалов за счет целенаправленного введения и последующей реализации контролируемых обратных связей с целью получения поверхностей деталей с диссипативными свойствами, необходимыми для заданных условий эксплуатации.

Практические результаты. По результатам проведенных исследований разработана методология обеспечения заданных эксплуатационных характеристик деталей изделий РКТ на основе методов фрактального анализа их поверхностей. В качестве оценочного критерия геометрико-структурных параметров фрактальных кластеров использована фрактальная размерность (1).

Согласно информационной схеме формирования (рис. 1), соответствующие технические требования к нанообъектам поступают в коррелятор автоматизированной системы формирования. Последний обрабатывает поступающую информацию, устанавли-

вает связь через интегратор между различными параметрами поверхности нанообъектов и обобщенным энергетическим показателем, оптимизируя их значения и формируя требуемые технические параметры.

В результате созданной информационной системы расчетным образом разработаны нанолазерное оборудование, материалы, технологии для авиакосмических объектов [4].

Методология включает анализ проектно-конструкторской документации, технических характеристик изделия; разработку моделей формирования кластерных систем; итерационный перебор моделей и их комбинаций и определение оптимального варианта; выбор методов, технологий и расчет режимов обработки, обеспечивающих эксплуатационные свойства деталей РКТ; разработку методов, методик проектирования оборудования, режимов, инструмента, оснастки.

Созданная автоматизированная информационная система проектирования изделий РКТ базируется на последовательности действий, описываемых "деревом целей для обеспечения качества поверхностного слоя деталей РКТ" (рис. 2).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванова В. С., Фолманис Г. Э. Фрактально-синергетический подход к разработке структурных информационных нанотехнологий // Нанотехнологии — технологии 21 века. М.: МГОУ, 2006. С. 47—48.
2. Усов С. В. Разработка систем автоматизации и информационные технологии, сокращающие сроки создания и освоения специальных изделий. М.: ИМВМ РАН, 2006. С. 78—87.
3. Ломаев В. И., Петров Д. В., Вячеславова О. Ф. Фракталы в размерной обработке деталей машин // Нанотехнологии — технологии 21 века. М.: МГОУ, 2006. С. 72—74.
4. Чуйкин С. А., Усов С. В. Основы проектирования технологии размерной обработки с применением методов фрактальной геометрии // Нанотехнологии — технологии 21 века. М.: МГОУ, 2006. С. 45.

Г. П. БИРЮКОВ, д-р техн. наук, Г. А. БЛАТИКОВ, инж., А. В. ТОРПАЧЕВ, канд. техн. наук
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Анализ качества стартовых комплексов с использованием системных показателей

При проектировании сложных технических систем, в частности стартовых комплексов (СК), большое внимание уделяется оценке надежности их составных частей. От надежности СК в целом зависит множество его характеристик, а также конкурентоспособность изделия на международном рынке аэрокосмических услуг. Надежность является одним из весомых показателей качества СК. Оценивать качество СК целесообразно на ранних этапах проектирования и не только по общепринятым показателям (надежности, безопасности, стойкости и др.), но и с помощью системных показателей качества.

Понятие организации элементной структуры стартового комплекса и методы ее оценки и анализа

Понятие организации как структурной характеристики качества элементной структуры (ЭС) СК играет важную роль при системном анализе разрабатываемых структур. Мера организации ЭС определяет качество функционирования СК. Мету организации ЭС СК можно выразить через энтропию. Энтропия ЭС СК достигает максимума, если агрегаты и системы независимы, т. е. состояние одного не влияет на состояние другого. В этом случае ЭС СК возрастает при наличии статистических связей между агрегатами и системами и достигает максимума при установлении функциональной зависимости. Таким образом, под организацией ЭС СК будем понимать ее энтропию.

Пусть СК принимает ряд дискретных состояний $H_1, H_2, \dots, H_m$. Если провести достаточно длительное наблюдение за СК, то по частоте любого из состояний можно судить о вероятностях через $P(H_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$. При этом должно выполняться соотношение

$$\sum_{i=1}^m P(H_i) = 1.$$

Интегральная энтропия дискретных величин $P(H_i)$

$$\mathcal{E}_S = - \sum_{i=1}^m P(H_i) \log_a P(H_i). \quad (1)$$

Интегральная энтропия $\mathcal{E}_S$ характеризует неопределенность в состоянии СК. Так, если любое из значений $P(H_i) \rightarrow 1$, то СК стремится к состоянию H_i . Если $P(H_i) = 1$, то СК становится детерминированным по элементной структуре. Устанавливают функциональные зависимости между агрегатами и системами и подсчет их энтропии дает $\mathcal{E}_S = 0$. Если вероятности $P(H_i)$ равны между собой, то энтропия СК будет максимальной. При $P(H_i) = P(H_2) = \dots = P(H_m) = \frac{1}{m}$ из выражения (1) получим

$$\mathcal{E}_{S_{\max}} = \log_a m. \quad (2)$$

Применяя любые законы распределения $P(H_i)$, кроме закона равной вероятности, получают значения энтропии, лежащие в интервале

$$0 \leq \mathcal{E}_S \leq \mathcal{E}_{S_{\max}}. \quad (3)$$

При этом у СК появляется тенденция предпочтения одних состояний другим. Причиной изменения закона распределения могут быть действия вышестоящей по уровню иерархии системы или отказы оборудования СК.

В качестве меры организации для оценки СК применяют следующую функцию:

$$\eta_S^0 = 1 - \frac{\mathcal{E}_S}{\mathcal{E}_{S_{\max}}}. \quad (4)$$

Согласно выражению (4), для СК с полностью детерминированной структурой относительный уровень организации η_S^0 максимален и составляет 1. И в то же время при $\mathcal{E}_S = \mathcal{E}_{S_{\max}}$ $\eta_S^0 = 0$. Таким образом, значения относитель-

ного уровня организации находятся в пределах

$$0 \leq \eta_S^0 \leq 1. \quad (5)$$

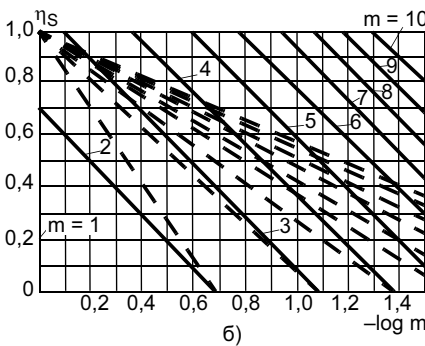
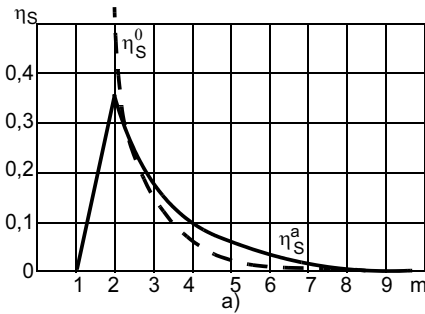
С помощью η_S^0 можно сравнивать по уровню организации СК с разнородной элементной структурой. Более высокому относительному уровню организации соответствует более экономичное расходование закладываемой, как правило, в ЭС СК избыточности при одном и том же начальном уровне неопределенности. При одном и том же начальном уровне избыточности и уровне начальной неопределенности СК с более высоким относительным уровнем организации обладают большей эффективностью функционирования. Таким образом, показатель относительного уровня организации близок по смыслу к кпд.

Из выражения (5) следует, что η_S^0 ЭС СК может изменяться в широких пределах. Если СК в результате доработок после испытаний или в процессе эксплуатации совершенствуется, то из практических соображений вполне закономерно предположить повышение уровня его организации. Полагая, что функция $\eta_S^0(t)$ дифференцируема и вычислив производную по времени, получим следующее условие повышения уровня организации СК в процессе совершенствования его структуры:

$$\mathcal{E}_S = \frac{d\mathcal{E}_{S_{\max}}}{dt} > \mathcal{E}_{S_{\max}} \frac{d\mathcal{E}_S}{dt}. \quad (6)$$

На рисунке, поз. а приведено изменение уровня абсолютной организации (сплошные линии) и относительного уровня организации (штриховые) в зависимости от числа состояний исследуемого СК. Видно, что показатели организации существенно зависят от количества состояний при заданных законах переходов.

На рисунке, поз. б видно, что изменение уровня абсолютной организации (сплошные линии) отображается гипотенузой равнобедренного прямоугольного треугольника с катетами, равными



Зависимость уровня абсолютной организации и относительного уровня организации от количества состояний комплекса (а) и $\log_a m$ (б)

$\log_a m$, и только в случае $m = 1$ вырождается в точку, в которой уровень организации равен нулю. Изменение относительного уровня организации (штриховые линии) отображается гипотенузой прямоугольного треугольника с катетами, равными 1 и $\log_a m$, и только в случае $m = 1$ вырождается в точку, в которой уровень организации равен 1.

Это условие означает, что скорость изменения уровня организации СК в процессе его совершенствования должна быть положительной.

Из выражения (6) при $\mathcal{E}_{S_{\max}} = \text{const}$ можно получить более простое по структуре и смыслу условие организации ЭС СК:

$$\frac{d\mathcal{E}_S}{dt} < 0. \quad (7)$$

Это условие означает, что уменьшение энтропии, т. е. повышение уровня организации, зависит от изменения закона распределения структурных состояний СК. При этом нужно стремиться к установлению функциональной зависимости между агрегатами и системами. Достигается это путем, например, закрепления связей между агрегатами системы жестким технологическим графиком и повышением надежности агрегатов и систем.

Также из выражения (6) при $\mathcal{E}_S = \text{const}$ можно получить другое простое по структуре и смыслу условие повышения уровня организации ЭС СК:

$$\frac{d\mathcal{E}_{S_{\max}}}{dt} > 0. \quad (8)$$

Это условие означает, что повышение уровня организации будет увеличиваться, если увеличивать количество состояний СК. Это может быть достигнуто, например, путем увеличения избыточности агрегатов и систем или увеличения разнообразных связей между агрегатами и системами. Однако этот путь не всегда возможен и целесообразен на практике. Поэтому наибольшее применение имеют методы повышения уровня организации СК, вытекающие из условия (7).

Условия (6)–(8) получены в предположении, что $\mathcal{E}_S$ и $\mathcal{E}_{S_{\max}}$ являются независимыми величинами. Такое предположение основано на том, что эволюция $\mathcal{E}_{S_{\max}}$ для СК связана в основном с действием вышестоящей по уровню иерархии системы, т. е. среды, с которой взаимодействует СК, а эволюция $\mathcal{E}_S$ — в основном с внутренними процессами перестройки, возникающими в ЭС СК в процессе его совершенствования по результатам испытаний и эксплуатации.

На основании соотношений (1) и (2) запишем уравнение (4) в виде

$$\eta_S^0 = 1 + \frac{\sum_{i=1}^m P(H_i) \log_a P(H_i)}{\log_a m}. \quad (9)$$

Кроме понятия относительного уровня организации, имеет смысл рассмотреть и понятие уровня абсолютной организации применительно к СК.

Согласно функции (4), показатель относительного уровня организации характеризует степень организации ЭС СК. Эта оценка удобна для сравнения вариантов СК, но не дает информации об абсолютных значениях организации как системного свойства СК.

Для определения количества организации как меры изменения организации сложных систем может быть использована следующая функция, характерная для комбинаторной теории информации:

$$O = k \ln N!, \quad (10)$$

где k — постоянный коэффициент, равный 1,443; N — количество элементов в системе.

Эту формулу можно применять только для СК, у которых каждый агрегат и система специализированы на выполнении только одной функции и нет избытка одинаковых агрегатов и систем. Видно, что такой подход может найти крайне ограниченное применение. Поэтому для решения задачи в общем случае следует учитывать, что, согласно выражению (4), уменьшение неопределенности связано со встречным увеличением показателя уровня организации. Это позволяет записать разностный критерий для оценки уровня абсолютной организации ЭС в виде

$$\eta_S^a = \mathcal{E}_{S_{\max}} - \mathcal{E}_S. \quad (11)$$

Из выражения (11) следует, что для СК с полностью детерминированной структурой уровень абсолютной организации $\eta_S^a = \mathcal{E}_{S_{\max}}$, так как $\mathcal{E}_S = 0$. И в то же время, если $\mathcal{E}_{S_{\max}} = \mathcal{E}_S$, то уровень абсолютной организации $\eta_S^a = 0$.

Таким образом,

$$0 \leq \eta_S^a \leq \mathcal{E}_{S_{\max}}. \quad (12)$$

По аналогии с выводом (6) можно получить следующее условие, выполнение которого будет свидетельствовать о повышении уровня абсолютной организации СК в процессе ее совершенствования:

$$\frac{d\mathcal{E}_{S_{\max}}}{dt} \left(1 - \frac{\partial \mathcal{E}_S}{\partial \mathcal{E}_{S_{\max}}} \right) > \frac{d\mathcal{E}_S}{dt}. \quad (13)$$

На основании анализа данного условия можно сделать следующие выводы.

1. Если вследствие увеличения числа агрегатов и систем или разнообразия связей между ними потенциально возможная неопределенность возрастает, т. е. $\partial \mathcal{E}_{S_{\max}} / \partial t > 0$, а внутренние процессы СК направлены так, что его структура с течением времени стремится к равной вероятности принятия любого из состояний, т. е. $\partial \mathcal{E}_S / \partial t > 0$, то для повышения уровня абсолютной организации ЭС СК необходимо, чтобы производная $\partial \mathcal{E}_S / \partial \mathcal{E}_{S_{\max}}$ была либо отрицательной, либо имела положительное значение меньше 1.

Причем для отрицательного значения производной $\partial \mathcal{E}_S / \partial \mathcal{E}_{S_{\max}}$ повышение уровня абсолютной организации ЭС СК достигает всегда.

2. Если в результате увеличения числа агрегатов и систем или разнообразия связей между ними потен-

циально возможная неопределенность возрастает, т. е. $\partial \Delta S / \partial \Delta S_{\max} > 0$, а внутренние процессы в СК направлены так, что с течением времени неопределенность уменьшается, т. е. $\partial \Delta S / \partial \Delta S_{\max} < 0$, то для повышения уровня абсолютной организации ЭС СК необходимо, чтобы $\partial \Delta S / \partial \Delta S_{\max} < 1$, т. е. чтобы текущая неопределенность уменьшалась или возрастала со скоростью, меньшей 1.

В то же время при наличии определенных соотношений по скоростям $\partial \Delta S_{\max} / \partial t$ и $\partial \Delta S / \partial t$ повышение уровня абсолютной организации ЭС СК возможно и при $\partial \Delta S / \partial \Delta S_{\max} > 1$.

На основании соотношений (1) и (2) уравнение (11) можно записать в виде

$$\eta_S^a = \log_a m + \sum_{i=1}^m P(H_i) \log_a P(H_i). \quad (14)$$

Практическое значение этих результатов заключается в том, что они позволяют, начиная с ранних стадий проектирования, производить количественный анализ структуры создаваемого СК с целью исследования возможных вариантов структуры для выбора базового, отличающегося максимально возможной простотой и максимально возможным уровнем организации [1, 2].

Свойства и характеристики качества операционной структуры стартового комплекса

Рассмотрим операционную структуру (ОС) СК, формализуемую системой последовательных технологических операций. Если ко всем элементам матрицы продолжительности технологических операций $\{\tau_{ij}\}$ прибавить (или вычесть) одно и то же число π , то значения времени $\bar{\tau}_{ij}$ простоя j -го агрегата или системы перед началом выполнения соответствующей операции на i -й ракете космического назначения (РКН) и времени $\underline{\tau}_{ij}$ ожидания i -й РКН выполнения соответствующей операции j -м агрегатом или системой останутся неизменными. Время окончания j -й технологической операции с i -й РКН по новой матрице

$$t_{ij}^K = t_{ij}^K \pm (i + j - 1)\pi. \quad (15)$$

Если все элементы матрицы $\{\tau_{ij}\}$ умножить или разделить на одно и то же число π , то значения $\bar{\tau}_{ij}$, $\underline{\tau}_{ij}$ и τ_{ij}^K увеличиваются или уменьшаются в π раз. Это свойство ОС СК целесооб-

разно применять в случае, когда элементы матрицы $\{\tau_{ij}\}$ велики и необходимо компактно отобразить большой процесс обслуживания РКН в определенном масштабе. Оба способа применяют также при решении задачи балансировки характеристик производительности агрегатов и систем СК.

Если из элементов матрицы $\{\tau_{ij}\}$, лежащих на одной диагонали, вычесть минимальный элемент $\tau_{r\min}$ или любое вещественное число, то значения $\bar{\tau}_{ij}$ и $\underline{\tau}_{ij}$ не изменятся. Время окончания j -й технологической операции с i -й РКН по новой матрице

$$t_{ij}^K = t_{ij}^K - \sum_{r=0}^{r_0} \tau_{r\min}, \quad (16)$$

где r_0 — номер диагонали, проходящей по элементу с индексами i, j ; r — текущий номер диагонали.

Если элементы одной диагонали равны между собой, то $\bar{\tau}_{ij}$ и $\underline{\tau}_{ij}$ равны нулю, и матрица $\{\tau_{ij}\}$ приобретает все свойства, характерные для ритмичного функционирования СК, хотя продолжительность составляющих этот процесс технологических операций может быть различной. Это подтверждает, что понятие ритмичного функционирования выводится не из условия $\tau_{ij} = \text{const}$, а из условия $\bar{\tau}_{ij} = \underline{\tau}_{ij} = 0$.

Рассмотрим теперь ОС СК, формализуемую системой последовательно-параллельных технологических операций. Если ко всем элементам матрицы $\{\psi_{ij}\}$ прибавить (или вычесть из них) одно и то же число π_1 , а к элементам матрицы $\{\varphi_{ij}\}$ также прибавить (или вычесть из них) одно и то же число π_2 , то $\bar{\tau}_{ij}$ и $\underline{\tau}_{ij}$ не изменятся. Время окончания j -й операции с i -й РКН по новой матрице

$$t_{ij}^K = t_{ij}^K - \pi_1 i - \pi_2 (i + j - 1). \quad (17)$$

Если из элементов матриц $\{\psi_{ij}\}$ и $\{\varphi_{ij}\}$, лежащих на одной диагонали, вычесть минимальные элементы или любое вещественное число, то $\bar{\tau}_{ij}$ и $\underline{\tau}_{ij}$ не изменятся. Время окончания j -й технологической операции с i -й РКН по новой матрице вычисляют по формуле (16), в которой t_{ij}^K определяют по формуле (15) или (17), а номер диагонали r_0 всегда четный, так как именно эти диагонали проходят по тем величинам φ_{ij} , для которых определяется t_{ij}^K .

Время окончания произвольной j -й технологической операции с i -й РКН

$$t_{ij}^K = \sum_{k=1}^i (\psi_{k1} + \varphi_{k1}) + \sum_{l=2}^j \varphi_{il} + \sum_{l=2}^j \underline{\tau}_{il} + \sum_{k=i+1}^n \sum_{l=2}^j \bar{\tau}_{kl} \quad (18)$$

или по формуле

$$t_{ij}^K = \sum_{l=1}^j (\psi_{1l} + \varphi_{1l} - \psi_{1, l+1}) + \sum_{k=1}^i (\psi_{kj} - \varphi_{kj}) + \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^j \bar{\tau}_{kl}. \quad (19)$$

Рассмотренные свойства матриц временных параметров целесообразно применять при расчете и анализе ОС СК и решении задач согласования агрегатов и систем по характеристикам производительности и надежности.

Кроме того, ОС СК могут быть охарактеризованы рядом других качественных характеристик, которые играют важную роль при сравнительном системном анализе проектируемых структур.

Для ОС СК, формализуемой системой последовательных технологических операций, T_p вычисляют по формуле

$$T_p = \sum_{j=1}^{n-1} \tau_{1j} + \sum_{i=2}^m \sum_{j=2}^n \bar{\tau}_{ij}. \quad (20)$$

Для режима краткоритмичного функционирования СК

$$T_p = \sum_{j=1}^{n-1} \tau_j + (m-1) \sum_{j=2}^n \max\{0; (\tau_{j-1} - \tau_j)\}. \quad (21)$$

Для режима ритмичного функционирования СК

$$T_p = T_c = (n-1)\tau. \quad (22)$$

T_c вычисляют по формуле

$$T_c = \sum_{j=2}^n \tau_{mj} - \sum_{j=2}^n \underline{\tau}_{mj}. \quad (23)$$

Для режима краткоритмичного функционирования СК

$$T_c = \sum_{j=2}^n \tau_j + (m-1) \sum_{j=2}^n \max\{0; (\tau_j - \tau_{j-1})\}. \quad (24)$$

Установившийся период функционирования СК

$$T_y = T_{mn}^K - T_p - T_c. \quad (25)$$

Отметим, что значения T_p и T_c могут быть достаточно велики, и тогда T_y будет близок к нулю. Поэтому для отнесения исследуемых процессов к классу установившихся или неуста-

новившихся необходимо дать определение установившемуся процессу обслуживания комплекта РКН.

Практически установившимся процессом обслуживания комплекта РКН, что эквивалентно установившемуся режиму функционирования СК, будем считать такой процесс, для которого соблюдается условие

$$T_y \geq \min\{T_p, T_c\}. \quad (26)$$

Для ОС СК, формализуемой системой последовательно-параллельных технологических операций, с учетом условия (26) получим

$$T_p = \sum_{j=1}^{n-1} (\psi_{1j} + \varphi_{1j} - \psi_{1,j+1}) + \sum_{i=2}^m \sum_{j=2}^n \tau_{ij}. \quad (27)$$

Время окончания произвольной j -й технологической операции с i -й РКН может быть вычислено по формуле (19).

Для режима краткоритмичного функционирования СК

$$T_p = \sum_{j=1}^{n-1} (\psi_j + \varphi_j - \psi_{j-1}) + (m-1) \times \sum_{j=2}^n \max\{0; (\psi_{j-1} + \varphi_{j-1} - \psi_j - \varphi_j)\}. \quad (28)$$

Для режима ритмичного функционирования СК

$$T_p = T_c = (n-1)\varphi. \quad (29)$$

Тогда с учетом формулы (23)

$$T_c = \sum_{j=2}^n \varphi_{mj} + \sum_{j=2}^n \tau_{mj}. \quad (30)$$

Время окончания произвольной j -й технологической операции с i -й РКН может быть вычислено также и по формуле (18).

Для режима краткоритмичного функционирования СК

$$T_c = \sum_{j=2}^n \varphi_j + (m-1) \times \sum_{j=2}^n \max\{0; (\psi_j + \varphi_j - \psi_{j-1} - \varphi_{j-1})\}. \quad (31)$$

Для ОС СК, формализуемой системой параллельно-последовательных технологических операций, с учетом выражений (29)—(31) получим

$$\dot{\varphi}_{ij} = \psi_{ij} + \varphi_{ij} - \psi_{i,j+1}; \quad (32)$$

$$\dot{\psi}_{ij} = \psi_{i,j+1}; \quad (33)$$

$$i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n;$$

$$T_p = \sum_{j=1}^{n-1} \dot{\varphi}_{1j} + \sum_{i=2}^m \sum_{j=2}^n \tau_{ij}. \quad (34)$$

$$T_c = \sum_{j=2}^n (\dot{\varphi}_{mj} + \dot{\psi}_{mj} - \dot{\psi}_{m,j-1}) + \sum_{j=2}^n \tau_{ij}. \quad (35)$$

Значения T_y можно вычислить по формуле (25).

Кроме рассмотренных характеристик T_p , T_y и T_c , для оценки и сравнения комплексных технических решений и проектов можно рекомендовать ряд следующих симплексных характеристик качества ОС СК.

Показатель равномерности потока обслуживаемых РКН, применение которого имеет смысл при $T_y > 0$:

$$\alpha = \frac{T_y}{T_{mn}^k}.$$

Показатель производительности СК:

$$\beta = \frac{m}{T_{mn}^k}.$$

Показатель расхода времени на обслуживание одной РКН:

$$\gamma = \frac{T_{mn}^k}{m}.$$

Показатель равномерности функционирования СК (для режима ритмичного функционирования):

$$\delta = \frac{T_{mn}^k + T_y}{2 T_{mn}^k}.$$

Показатель неравномерности использования оборудования СК (для режима ритмичного функционирования):

$$\varepsilon = \frac{T_{mn}^k - T_p - T_c}{T_{mn}^k}.$$

Показатель совмещенности технологических операций во времени:

$$S = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\psi_{ij} + \varphi_{ij}) - T_{mn}^k}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (\psi_{ij} + \varphi_{ij}) - \max_j \left\{ \sum_{i=1}^m (\psi_{ij} + \varphi_{ij}) \right\}}.$$

Все эти показатели характеризуют эффективность создаваемого СК.

Выше проанализированы теоретические вопросы формирования элементной и операционной структур СК. Практическое значение этих результатов заключается в том, что они позволяют на ранних стадиях проектирования производить количественный анализ структуры создаваемого СК с целью исследования возможных вариантов структуры для выбора базово-

го, отличающегося максимально возможной простотой и максимально возможным уровнем организации.

Операционная структура СК характеризуется составом технологических операций, связями между ними и набором временных параметров, которые являются временными характеристиками исследуемого СК.

К задачам разработки и исследования структуры СК относятся:

- изучение директивной технологии работ с РКН и определение состава технологических операций для каждого технологического цикла эксплуатации и подготовки к пуску;
- анализ производительности и надежности агрегатов и систем ЭС СК и расчет потенциальных затрат времени на выполнение каждой технологической операции;
- разработка альтернативного множества вариантов ОС СК;
- оценка и анализ временных характеристик, сложности и показателей организации для каждого варианта ОС СК;
- выбор базового варианта ОС СК и комплексная оценка его эффективности;
- разработка пооперационных технологических графиков функционирования СК и составление операционного описания создаваемого СК.

Кроме того, анализ ЭС и ОС СК необходим для решения таких проектных задач, как разработка управляющих алгоритмов оборудованием СК, обоснование эффективности СК, а также оценка производительности, надежности, стоимости, оперативности и других системных показателей СК, характеризующих степень их технического совершенства.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бирюков Г. П. Структурный анализ и обоснование тактико-технических характеристик технологического оборудования ракетно-космических комплексов. М.: Издательство МАИ, 2003. 312 с.
2. Бирюков Г. П. Обеспечение надежности наземного технологического оборудования ракетных комплексов морского базирования. М.: Издательство МАТИ им. К. Э. Циолковского, 2001. 148 с.
3. Основы проектирования ракетно-космических комплексов / Г. П. Бирюков, Б. К. Гранкин, В. В. Козлов, В. Н. Соловьев // СПб.: Алфавит, 2002. 396 с.
4. Бирюков Г. П., Кукушкин Ю. Ф., Торпачев А. В. Основы обеспечения надежности и безопасности стартовых комплексов. М.: Издательство МАИ, 2002. 264 с.

И. П. СОЛОВЬЕВА, канд. экон. наук, Т. А. АСАЕВА, канд. физ.-мат. наук
Рязанский институт (филиал) МГОУ

Сокращение логистических затрат на стадии формирования транспортных подразделений машиностроительных предприятий

Переход российской экономики на рыночные условия хозяйствования и усиление интеграционных связей промышленного производства обусловили возрастание роли транспортной логистики в обеспечении высоких экономических результатов деятельности машиностроительных предприятий.

В западных странах транспортная логистика является практически инструментом в управлении бизнесом. Зарубежный опыт показывает, что сокращение удельных расходов на логистические операции на 1 % обеспечивает экономический эффект, равнозначный увеличению объема реализации продукции на 10 %. Это связано с влиянием уровня логистических издержек на экономическое положение предприятия и его конкурентоспособность. Логистические издержки выступают как инструмент управления, применение которого обеспечивает увеличение прибыли, финансовых возможностей и расширяет хозяйственную самостоятельность предприятий.

Эффективная реализация имеющихся резервов при применении логистических подходов к управлению материальными и информационными потоками машиностроительного производства позволяет значительно снизить запасы материальных ресурсов в производственной сфере и сфере обращения, ускорить оборачиваемость оборотных средств, снизить себестоимость продукции, увеличить прибыль предприятий более чем на 30 %.

Зависимость машиностроительного производства от полного и своевременного обеспечения необходимыми материально-техническими ресурсами определяет объективную необходимость совершенствования организации и управления логистическими процессами на предприятиях отрасли. Важная роль в решении данной проблемы принадлежит транспортной логистике как одному из значимых компонентов, обеспечивающих обслуживание всех стадий современного машиностроительного производства. При этом проблемы логистического обслуживания производственных процессов машиностроительных предприятий нельзя считать в достаточной степени изученными и разработанными, они требуют дальнейших глубоких исследований.

Организация логистического обслуживания машиностроительного производства должна осуществляться с учетом целей и задач экономического развития и приоритетности интересов машиностроительной отрасли.

При обслуживании движения материальных потоков с увеличением объема перевозок затраты возрастают. Однако в машиностроительном производстве наблюдается тенденция роста транспортных издержек без увеличения объема перевозок. Большая доля приходится на материальные затраты, в частности на горюче-смазочные материалы. В связи с этим одним из направлений снижения себестоимости машиностроительной продукции является сокращение затрат на перевозки.

Проведенный авторами анализ выявил, что на себестоимость перевозок влияет большое число факторов как внутрипроизводственных, которые зависят от организации работ на предприятии, так и внешних, зависящих от рыночной ситуации. В связи с невозможностью рассмотрения всех факторов предлагается структурировать данные факторы во взаимосвязи со стадией производственного процесса и поставленной целью.

В настоящее время машиностроительные предприятия стремятся обслуживать движение внешних материальных потоков собственными транспортными подразделениями. В связи с этим целесообразным является снижение логистических затрат на стадии формирования транспортных подразделений, так как в большинстве логистических цепочек до 35 % резервов возможного сокращения затрат приходится на допроизводственные стадии.

В данной работе рассмотрена задача формирования состава транспортных подразделений 30 машиностроительных предприятий с учетом влияния на себестоимость перевозок следующих факторов: количества, возрастной структуры транспортных средств и вида используемого топлива.

Выбор данных факторов связан с возможностью устранения их негативного влияния на стадии принятия решения о приобретении транспортных средств. На взаимосвязь между себестоимостью и приведенными факторами могут воздействовать случайные неучтенные обстоятельства. Так, на уровень себестоимости перевозок каждого отдельно взятого транспортного средства могут влиять техническое состояние, квалификация водителей и другие факторы, влияние которых взаимосвязано. Поэтому в данной ситуации целесообразно использовать корреляционно-регрессионный анализ для построения экономических моделей и оценки их параметров.

В этом случае уравнение регрессии имеет вид

$$Y = f(x), \quad (1)$$

где Y — случайная зависимая величина; x — величина, рассматриваемая как случайная независимая переменная.

По экспериментальным данным необходимо математически формализовать функцию таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений между экспериментальными значениями и значениями функции, полученными с помощью формул, была минимальной. Для этого применим метод наименьших квадратов, а в качестве меры адекватности регрессионной модели статистическим данным — коэффициент детерминации

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

где $\hat{y}_i$ — расчетное (теоретическое) значение y для x_i , рассчитанное по уравнению регрессии; $\bar{y}$ — среднее значение y ; y_i — значение y в i -м эксперименте.

Коэффициент детерминации позволяет определить, в какой степени найденная регрессионная прямая обеспечивает лучший результат для описания поведения зависимой переменной y по сравнению с горизонтальной прямой $y = \bar{y}$.

Если имеются данные об однотипных объектах в один и тот же момент времени, то для оценки по ним уравнения регрессии коэффициент детерминации не должен превышать 0,6—0,7. Так как статистические данные по зависимости себестоимости от ряда факторов невозможно описать линейным уравнением, то необходимо определить нелинейную модель. Эта задача решается с использованием возможностей программного обеспечения Microsoft Excel.

Проведенный анализ выявил, что зависимость себестоимости 10 т-км от числа условных транспортных средств адекватно описывается полиномиальной функцией третьей степени (рис. 1, а) следующего вида:

$$y = 0,0074x^3 - 0,3097x^2 + 2,2508x + 59,406; \quad (3)$$

$$R^2 = 0,146,$$

где y — себестоимость 10 т-км; x — число условных транспортных средств.

На основании анализа приведенной зависимости можно сделать вывод, что наличие менее 30 условных единиц подвижного состава является нерациональным, так как ведет к повышению себестоимости транспортировки грузов.

Зависимость себестоимости 10 т-км от числа транспортных средств, использующих различное топливо, описывается уравнением следующего вида (рис. 1, б):

$$y = -0,0122x^3 + 0,5434x^2 - 4,679x + 42,371; \quad (4)$$

$$R^2 = 0,3644,$$

где y — себестоимость 10 т-км; x — число транспортных средств, работающих на бензине, %.

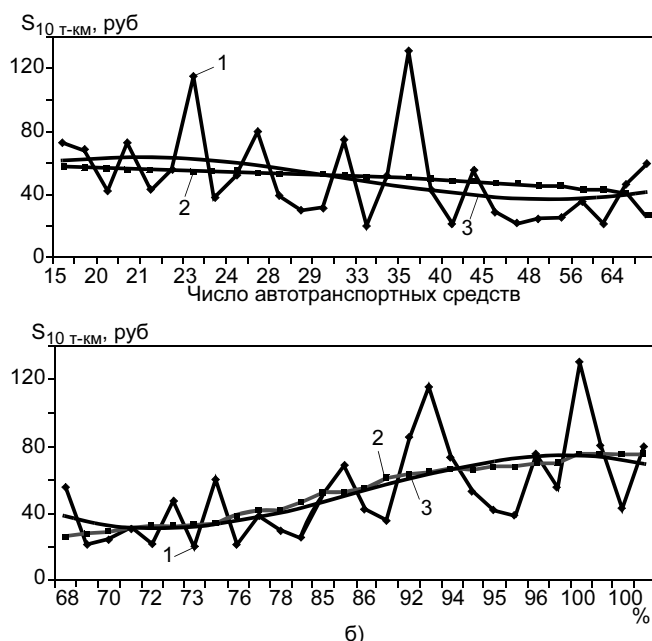


Рис. 1. Зависимость себестоимости перевозок от числа условных транспортных средств (а) и вида используемого топлива (б): 1 — фактическая; 2 — прогнозируемая; 3 — расчетная

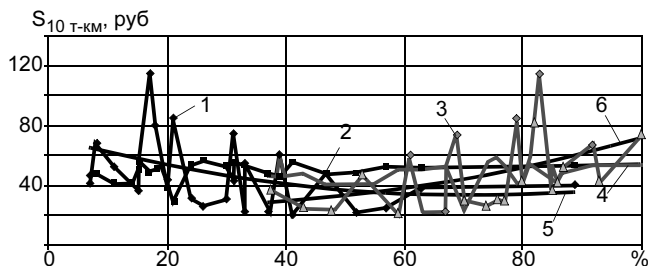


Рис. 2. Зависимость себестоимости перевозок от возрастной структуры транспортных средств: 1 — до 8 лет эксплуатации; 2 — прогнозируемая до 8 лет эксплуатации; 3 — свыше 8 лет эксплуатации; 4 — прогнозируемая свыше 8 лет эксплуатации; 5, 6 — расчетная до 8 и свыше 8 лет эксплуатации соответственно

Из данной зависимости следует, что чем больше транспортных средств с карбюраторными двигателями, тем выше себестоимость перевозок. Это объясняется тем, что газомоторное и дизельное топливо является относительно дешевым, кроме того, дизельные двигатели обладают более высоким ресурсом надежности по сравнению с карбюраторными.

Зависимость себестоимости 10 т-км от возрастной структуры транспортных средств выражается полиномиальной функцией второй степени (рис. 2):

$$y = -0,00375x^2 + 2,4298x + 24,075; \quad (5)$$

$$R^2 = 0,2152,$$

где y — себестоимость 10 т-км; x — число транспортных средств, находящихся в эксплуатации, %.

Из полученной зависимости следует, что себестоимость перевозок возрастает с увеличением числа транспортных средств, находящихся в эксплуатации свыше 8 лет (после этого срока они являются физически и морально устаревшими).

Эффективность использования транспортных средств резко снижается за счет увеличения затрат на ремонт, перерасхода ГСМ, снижения средней эксплуатационной скорости и других параметров.

На основании проведенного корреляционно-регрессионного анализа установили следующее:

- нерационально формировать транспортные подразделения в количестве менее 30 условных единиц подвижного состава;
- при выборе транспортных средств, работающих на различных видах топлива, предпочтение следует отдавать газомоторным и дизельным;
- нерациональна эксплуатация транспортных средств свыше 8 лет.

Проведенные расчеты показали, что при использовании разработанной методики формирования транспортного парка экономия затрат машиностроительных предприятий на перевозки в среднем составит 27 %. Данный показатель может быть улучшен при дальнейшем совершенствовании логистических подходов, обеспечивающих экономически обоснованные хозяйственные решения на всех уровнях управления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федосеев В. В. Экономико-математические модели и методы в маркетинге. М.: Финстатинформ, 1996.
2. Первозванский А. А., Первозванская Т. Н. Финансовый рынок: расчет и риск. М.: ИНФРА-М, 1994.

Содержание зарубежных журналов¹

American Machinist
(№ 3, 2008, США)

Обработка суперсплавов, с. 10, ил. 1.

Обработка жаропрочных суперсплавов, применяющихся, например, для изготовления турбин авиационных двигателей, всегда представляла проблему, что связано с высокой прочностью этих материалов. Удельная сила резания составляет 4000 Н/мм^2 , что в 1,6 раза больше удельной силы резания для обычной стали. Фирма Sandvik Coromant разработала стратегию обработки подобных сплавов на основе оптимизации новейших режущих инструментов и методов обработки.

Vernyi B. Обработка материалов для авиационной промышленности, с. 28—29.

Рассматриваются проблемы обработки в связи с ростом объема механической обработки титана, алюминия и сплавов с высоким содержанием никеля, применяемых при изготовлении деталей самолетов и вертолетов. Приведены веб-сайты авиационных фирм США, на которых содержится информация о потребностях фирм в инструментах, станках и технологиях обработки.

Обработка деталей водоструйного двигателя, с. 36—39, ил. 2.

Описывается опыт фирмы CWF Hamilton & Co. (Новая Зеландия) в области технологии обработки деталей водоструйного двигателя судов. Многие детали получают методом литья, которые затем проходят токарную и фрезерную обработку на многоцелевых станках с ЧПУ. Крыльчатки крупных двигателей имеют диаметр от 420 до 1100 мм и обрабатываются на горизонтальном многоцелевом станке с ЧПУ. В настоящее время фирма использует четыре пятикоординатных токарных станка, причем держать под контролем все зоны резания не представляется возможным без программного обеспечения системы CAM.

Benes J. Балансировка инструментальных патронов, с. 46—48, 50, ил. 2.

Приведены базовые положения балансировки, позволяющие сократить затраты времени и отвечающие требованиям двух стандартов о балансировке патронов и шпинделей станков — ISO 1940 и ANSI S2.19. Выделяются три критерия контроля баланса: вибрация, силы резания и возможность обработки детали, причем наиболее часто имеют дело с контролем вибрации. Уровень дисбаланса характеризуется параметром G (мм/с). По данным исследований, патрон с уровнем дисбаланса $G12$, вращающийся с частотой $15\,000 \text{ мин}^{-1}$, вызывает дополнительное радиальное биение $4,1 \text{ мкм}$.

Bates Ch. Модификация станка, с. 62—63, ил. 1.

Описывается опыт фирмы Hagon Products по модернизации токарного центра Tornado T8MSY фирмы Colchester-Harrison. Такой станок может обрабатывать прутки диаметром 45 мм со смещением оси Y относительно оси станка на $\pm 40 \text{ мм}$. 12-позиционная револьверная головка, все шпиндели которой вращаются с частотой 5000 мин^{-1} и

имеют привод мощностью $3,7 \text{ кВт}$, совместима с инструментальной оснасткой и большей частью программного обеспечения фирмы Fanuc.

Обработка титана, с. 67—68, ил. 1.

Фирма Dorries Scharmann Technologie, учитывая особенности обработки сплавов титана и армированных волокнами слоистых материалов, используемых при изготовлении деталей аэрокосмической промышленности, создала новые многоцелевые станки Esoforge модульного типа моделей 2035 и 2060. Трехкоординатная головка выполняет черновую обработку со съемом материала $450 \text{ см}^3/\text{мин}$, а пятикоординатная фрезерная головка вилочного типа выполняет чистовую обработку со съемом материала $140 \text{ см}^3/\text{мин}$. Система охлаждения работает с давлением 15 МПа . Максимальная масса обрабатываемых деталей 8000 и 12000 кг соответственно моделям станка.

Обработка деталей аэрокосмической промышленности, с. 68, ил. 1.

Фирма Breton S. p. A. выпускает ряд станков серии Flymill моделей 1000, 1300, 1600 и 2000, отличающихся длиной вертикального перемещения шпиндельной головки. Стандартное горизонтальное перемещение составляет от 2000 до 8000 мм . Скорость рабочего перемещения 40 м/мин , холостого — 60 м/мин . Шпиндель вращается с частотой $40\,000 \text{ мин}^{-1}$ и имеет вращающий момент $220 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Станки оснащаются инструментальным магазином емкостью 30 инструментов диаметром до 140 мм и длиной до 300 мм .

EDM European
(Winter, 2007, международный)

Электроэрозионный копировально-прошивочный станок для прошивки микроотверстий, с. 8.

На копировально-прошивочном станке EDNC30F фирмы Makino (Япония) было прошито отверстие диаметром 11 мкм с помощью электрода диаметром 6 мкм , изготовленного из серебра и вольфрама. При испытаниях, проведенных в Японии, допуск на диаметр выдерживался в пределах $\pm 1,3 \text{ мкм}$. Точность позиционирования станка 12 мкм , а толщина обработанной заготовки 25 мкм . Восемь отверстий прошили за $2 \text{ мин } 40 \text{ с}$, причем каждое отверстие прошивали за 20 с . Обработку выполняли одним электродом, который был изношен на 40% .

Cutting Tool Engineering
(№ 7, Vol. 59, 2007, США)

Микростанок, с. 77, ил. 1.

Описан микростанок WU-305 фирмы Schütte TGM для изготовления миниатюрных режущих инструментов и деталей инструментальной оснастки. Станок стандартного исполнения включает линейные двигатели по всем осям, устройство для автоматической смены шкивов, запатентованное устройство для загрузки инструментов и устройство для наружного шлифования.

Заточный станок с ЧПУ, с. 80, ил. 1.

Универсальный станок с ЧПУ MCT5000 для заточки режущих инструментов фирмы Machine Control Technology (США) обеспечивает обработку по пяти осям и позволяет затачивать стандартные и специальные режущие инстру-

¹ Раздел подготовлен инж. Г. С. Потаповой (по вопросам получения материалов обращаться по тел./факсу: (495) 611 2137, e-mail: stankoinform@mail.ru).

менты и режущие пластины из коррозионно-стойкой стали, твердых сплавов и поликристаллических алмазов. Станок обеспечивает комплексную обработку инструмента с винтовыми и прямыми стружечными канавками, с первичными и вторичными задними углами, со ступенчатой режущей частью с одной установкой.

DIMA (Die Maschine)
(№ 8, Vol. 61, 2007, Германия)

Повышенная производительность обработки деталей малых размеров, с. 17, ил. 2.

Сообщается о демонстрировавшихся на выставке ЕМО 2007 новых технологиях с использованием усовершенствованных инструментов некоторых фирм, обеспечивающих повышенную производительность и высокую точность обработки. Описана технология обработки микроотверстий на небольших автоматических токарных станках.

Тенденции развития технологии машиностроения, с. 43, ил. 3.

Приведены сведения о состоявшейся Международной выставке EuroMold 2007, на которой были представлены достижения в области технологий обработки резанием, литейного производства, формирования деталей штамповкой. Демонстрация экспонатов выставки показала основные тенденции развития в разных областях этих технологий. В частности, указывается на развитие средств испытаний и измерений инструментов резания, новые ПО, совершенствование процессов электроэрозионной обработки и многие другие достижения.

Gutsch V. Правка шлифовального круга, с. 47—49, ил. 3.

Указывается на существенную роль процесса правки с точки зрения качества шлифованной поверхности и рассматриваются наиболее часто встречающиеся ошибки при правке шлифовального круга. Анализируются процессы правки неподвижными вращающимися инструментами. Речь идет, в первую очередь, об обеспечении жесткости инструмента для правки и правильном выборе глубины врезания этого инструмента в процессе правки, которая не должна превышать 0,03 мм.

Maschine und Werkzeug
(№ 6, Vol. 108, 2007, Германия)

Уникальный обрабатывающий центр, с. 20—22, ил. 11.

Фирма Maschinenfabrik Berthold Hernalte AG (Германия) выпустила обрабатывающий центр C 40 Alchemu для формирования на детали элементов из другого материала без применения лазера и сварки. Для этого в ось Z встроено устройство для подачи порошкообразного металла, а в поворотном-вращающемся стол — система нагрева с теплообменником. С помощью центра можно получать каналы охлаждения из меди, расположенные в непосредственной близости от оформляющего контура. Для проведения этого процесса требуются лишь вода, сжатый воздух и электрический ток.

Электроэрозионный станок Edac I для микрообработки, с. 54, 55, ил. 5.

Станок, изготавливаемый фирмой Makono (Япония), предназначен в первую очередь для получения микроструктурных элементов на деталях с размерами до 220 × 180 × 200 мм и радиусом скруглений 0,005 мм. Точность позиционирования по осям равна 2 мкм, параметр шероховатости получаемых поверхностей $Ra = 0,0060 \div 0,0065$ мкм. Такая

точность обеспечивается, в частности, системой термостабилизации, снижающей температурные колебания станка до $\pm 0,5^\circ\text{C}$.

Угловые сверлильные и фрезерные головки, с. 68, ил. 4.

Разработкой и изготовлением головок занимается более 20 лет фирма MimaticZehl GmbH (Германия). Сейчас в ее программе насчитывается более 1000 видов и типов-размеров головок в одно- и многошпиндельном исполнении. Все они бесступенчато поворачиваются на угол 360° , работают при частоте вращения до 15 000 мин⁻¹ и крутящем моменте до 150 Н · м, могут иметь систему подачи СОЖ под давлением до 70 бар и систему быстрой смены mimetic. Головки предназначены для оснащения обрабатывающих центров с ЧПУ для обработки металлов и древесины.

Система надежного предотвращения столкновений в станках, с. 100, 101, ил. 2.

Современные многоосные станки требуют обширных программ, доводка которых требует хорошего опыта наладчика и нескольких часов времени. При большом количестве заказов это неприемлемо. Фирма Okuma (Япония) разработала новую систему управления такими станками OSP-P200 с подсистемой CAS, обеспечивающей исключение возможных столкновений при снижении затрат времени на доводку до 50 %, причем сама доводка может выполняться при изготовлении первой детали, а ее наиболее критические моменты отображаются на экране красным цветом. Для функционирования подсистемы в систему вводятся необходимые исходные данные.

Modern Machine Shop
(N 9, Vol. 79, 2007, США)

Lynch M. Пробное точение на токарном центре с подвижной передней бабкой, с. 112, 114, ил. 2.

Рассматривается опыт фирмы CNC Concepts, Inc. по пробной обработке первой детали и ее контролю в предупреждении простоев при обработке партии деталей на токарном центре продольного точения. Приводится пример подготовки управляющей программы с выполнением операций точения, торцевания, растачивания, сверления и др.

Вертикальный обрабатывающий центр с размерным контролем, с. 150, ил. 1.

Описан обрабатывающий центр HSM Loox Pro med фирмы Mikron. Отмечаются высокая точность, надежность и отработка заданных траекторий, необходимые для обработки имплантатов и других медицинских деталей. Станок оснащен системой ЧПУ Heidenhain iTNC 530 и модулями "идеальной механообработки", позволяющими осуществлять размерный контроль инструмента и деталей, мониторинг вибраций шпинделя, калибровку геометрии станка и передавать данные процесса оператору на монитор. Конструкция станка основана на использовании станины из полимерабетона, повышающего демпфирование и термоустойчивость.

Изготовление сложных медицинских деталей, с. 159.

Описан пятикоординатный обрабатывающий центр VTXU фирмы Hurco Companies Inc., предназначенный для многосторонней обработки сложных деталей для медицинских зеркал, офтальмологических устройств, сканеров сетчатой оболочки глаза и других с высокой точностью и укороченным временем наладки. Приведены характеристики станка: мощность главного привода 18 кВт, верхний предел час-

тоты вращения шпинделя 12 000 об/мин, длина координатных перемещений по осям X, Y, Z составляет 800, 698, 508 мм соответственно, размеры стола 600 × 500 мм, грузоподъемность 262 кг, скорость быстрых ходов 35 м/мин, повторяемость 0,0025 мм. Станок оснащен 32-местным устройством автоматической смены инструмента с державками CAT40.

Нетоксичная биоразлагаемая СОЖ, с. 159, 160, ил. 1.

Описана СОЖ Accu-Lube LB-2000F фирмы ITW Rocol North (США). Отмечена ее экологическая безопасность и приведена рекомендуемая область применения — производство медицинских изделий, требующих операций точения, фрезерования, сверления отверстий малых диаметров и нарезания в них резьбы.

Токарный автомат для изготовления медицинских деталей с ЧПУ, с. 171.

Описан автомат продольного точения TMU1 фирмы Tsugami с подвижной передней бабкой для обработки прутков диаметром до 38 мм и длиной 250 мм. Отмечается наличие давилочного кулачка, используемого для обработки костных винтов. Указывается на возможность выполнения операций фрезерования, диагонального сверления, нарезания зубьев шестерен червячной фрезой, резки по окружности канавок и кулачков. Станок имеет два шпинделя с верхним пределом частоты вращения 6000 мин⁻¹, 62-местное устройство автоматической смены инструмента с кулачковым приводом, а также фронтальную револьверную головку на 16 позиций и инструментальный шпиндель с углом поворота до 210° относительно оси В.

(№ 10, Vol. 79, 2007, США)

Нарезание резьбы, с. 54, ил. 1.

Описан портативный манипулятор FlexArm, позволяющий нарезать резьбу до 2 дюймов (50,8 мм), а также снимать фаски, развертывать, торцевать, зенкеровать, завертывать винты и гайки, вставлять пружины в отверстия и т. п. Отмечается возможность освобождения от указанных операций дорогостоящих станков с ЧПУ. Указывается на постоянное сохранение положения шпинделя манипулятора перпендикулярно к поверхности детали за счет балансировки в его конструкции.

Lynch N. Применение чертежей технологических переходов, с. 112, 114, ил. 1.

Рассматривается применение чертежей отдельных технологических переходов при подготовке управляющих программ станков. Указывается на непригодность чертежей готовых деталей для операторов станков с ЧПУ, так как в них не указаны припуски на промежуточные технологические операции. Даны рекомендации по расчетам допусков на все размеры последовательных этапов обработки детали, в частности припуска токарной обработки для последующего шлифования.

Программное обеспечение, облегчающее точение и фрезерование резьбы, с. 156, 157, ил. 1.

Описаны программы фирмы Seco Tools Inc., позволяющие исключить ручные расчеты, сократить время цикла и повысить точность при точении и фрезеровании резьбы. ПО The Thread Turning Wizard выбирает оптимальный резец с пластиной и наилучшие параметры резания, вводимые в систему ЧПУ станка (тип резьбы, диаметр, глубину

и вид материала, по которым создаются требуемые коды обработки для ввода в систему ЧПУ станка).

Фильтровальные установки для очистки СОЖ, с. 216, 218, ил. 1.

Описаны фильтровальные установки серии Evolution фирмы Ebbco Inc., предназначенные для тонкой очистки СОЖ и масел при резании металлов и шлифовании при использовании инструментов из твердых сплавов, инструментальной стали и керамики и алмазных кругов. Отмечено, что очистка производится до размера 1 мкм с контролем температуры. Размеры установки 2286 × 990 мм. Установки комплектуются пятью фильтровальными картриджами на 13,5 кг шлама каждый.

Токарно-фрезерный станок с ЧПУ, с. 222, 224, 225, ил. 1.

Фирма Femco экспонировала на выставке Westec 2007 в США высокоскоростной токарно-фрезерный станок HL-25DM, оснащенный 23-позиционной, двухдисковой револьверной головкой Durga. По данным фирмы, головка обеспечивает быстрые переналадки и смены инструментов. В ней устанавливаются 12 резцов для наружной обработки и 11 для внутренней. В гнездах для внутренних резцов могут устанавливаться вращающиеся инструменты с осевой и радиальной подачей.

Лазерная резка крупных плит, с. 253.

Описан станок портальной конструкции Alpharex AXD фирмы ESAB Cutting Systems, оснащенный лазерным резатором, позволяющим резать детали практически неограниченной длины. Мощность станка составляет от 3,2 до 6 кВт, а ширина детали — до 500 мм. К числу особенностей отнесены определение повреждения окна, адаптивная оптика, модульная режущая головка, устойчивая подача луча, контроль лазерного процесса, автоматическая фокусировка, конусная резка, лазерная маркировка и сварка. Станок оснащен фирменной системой технического зрения Vision CNC и системами программирования Colombus, облегчающими резку крупных плит.

(№ 11, Vol. 79, 2007, США)

Удаление масляного тумана, дыма и запахов, с. 178, 179.

Описана установка фирмы LNS America Inc., показанная на выставке PMTS 2007 и предназначенная для создания комфортных и безопасных условий работы операторов металлорежущих и электроэрозионных станков. Отмечено наличие пяти моделей установок емкостью от 4811 до 35 375 дм³, использующих трехступенчатые системы фильтрации тумана, пара, дыма и запаха с трехэлементным картриджем, центробежным фильтром дренажа жидкости и удлиненного фильтра из стекловолнока.

Система автоматизированного проектирования и управления производством PartMaker, с. 183, 185, 186, ил. 1.

Описана система CAD. CAM в версии 8 фирмы Part-Maker Inc. (США) с улучшенным моделированием перемещений узлов станка и предупреждением ошибок для проектирования деталей и подготовки управляющих программ для фрезерных, токарных станков с ЧПУ, автоматов продольного точения, проволочно-вырезных электроэрозионных станков. Отмечается возможность представления фотореалистичной трехмерной модели станка, для которого программируется обработка детали с выявлением возможных столкновений инструмента и оснастки и их исключением на персональном компьютере.

12-я Международная специализированная выставка "Интерлакокраска—2008"

На территории ЦВК "Экспоцентр" (Москва) с 4 по 7 марта 2008 г. проходила 12-я Международная специализированная выставка "Интерлакокраска—2008", организованная ЗАО ПИК "МАКСИМА".

В выставке участвовали около 300 экспонентов из 23 стран, в том числе 200 российских.

В статье приведено краткое описание лакокрасочных материалов (ЛКМ) и оборудования, используемого в машиностроении.

ООО "Научно-производственная фирма "Электростатическое распыление" (ЭЛСТАР) (Москва) предложило потребителям новые технологии и оборудование для порошковой окраски.

Установку УНП-1/3000 для нанесения порошковых покрытий любых видов на электропроводное изделие ручными или автоматическими распылителями с электростатической или трибоэлектрической зарядкой. Установка состоит из камеры напыления (порошковой окрасочной камеры), фильтра-рекуператора, состоящего из откатного блока фильтрации, регенератора, вентилятора и пульта управления. Откатной блок фильтрации содержит фильтр с фильтрующими элементами и сборную емкость для приема порошка, соединен с камерой напыления. Порошковую краску наносят на изделие в окрасочной камере, в которую изделие подается конвейером, расположенным в проходной камере. Заряженные частицы порошковой краски, выходящие из распылителя, осаждаются на поверхности окрашиваемого заземленного изделия. Порошковая краска, не осевшая на изделие, направляется потоками воздуха, отсасываемого из окрасочной камеры фильтром-рекуператором, на фильтрующие элементы. На поверхности фильтрующего материала происходит отделение порошка от потока воздуха. Чистый воздух выбрасывается вентилятором в отточную вентиляцию. По мере запыления фильтрующих элементов происходит их очистка в автоматическом режиме системой регенерации, обратной импульсной продувкой фильтров сжатым возду-

хом. При этом порошковая краска сбрасывается с поверхности фильтрующего материала. Мощность установки 6 кВт, объем отсасываемого воздуха 4000 м³/ч, масса распыляемой порошковой краски в окрасочной камере 20 кг/ч, степень очистки воздуха на выходе фильтра тонкой очистки 99,995 %, среднее время смены цвета краски 20 мин. Габаритные размеры окрашиваемого изделия в камере с раздвижными тамбурами без ограничения 700 × 1300 мм.

Комплект распылительного электрооборудования КРВП-22-60-К для оснащения автоматических линий порошковой окраски. Он состоит из двух распылителей ЭПС-2, работающих в автоматическом режиме, двух блоков управления КРВП-21-60, двух эжекторов ЭП-2, передвижной стойки СПР-12 и бункера-дозатора Д2-40 вместимостью 40 кг. В распылительном комплекте предусмотрены следующие режимы окрашивания: плоские изделия, нанесение повторного слоя, сложные изделия, максимальная мощность. При окраске изделий повторно по оплавленному слою и изделий сложной формы зарядная система переходит в режим запятого коронного разряда. При этом практически полное отсутствие свободных ионов в рабочем промежутке приводит к эффекту, аналогичному напылению порошковой краски трибоэлектрическими распылителями. Питание комплекта 220 В, выходное напряжение до 80 кВ, потребляемая мощность 60 Вт, давление в сети сжатого воздуха 0,5—1,0 МПа, расход сжатого воздуха 250 л/мин. Габаритные размеры комплекта 680 × 658 × 1414 мм, масса 70 кг.

Фильтр-рекуператор ФР-8-11000-Б для очистки воздуха от любых видов сухих порошковых материалов (степень очистки воздуха на выходе 99,8 %, при комплектации фильтром тонкой очистки — 99,995 %). Он также обеспечивает высококачественную очистку воздуха от твердых частиц, а при использовании в процессе порошковой окраски позволяет возвращать порошковую краску в технологический процесс. В основе работы фильтра лежит очистка воздуха от пыли при прохож-

дении пылевоздушной смеси через пористый материал. Конструктивно фильтр-рекуператор представляет автономную установку, состоящую из откатного блока фильтрации (восемь фильтров), вентилятора, регенератора и пульта управления, работающего в ручном или автоматическом режиме. Работает фильтр следующим образом. Запыленный воздух всасывается вентилятором. Отделение порошка от потока воздуха происходит на поверхности фильтрующих элементов. Чистый воздух выбрасывается вентилятором в отточную вентиляцию. По мере запыления фильтрующих элементов происходит их очистка в автоматическом режиме, выполняемая системой регенерации, обратной импульсной продувкой фильтров сжатым воздухом. Порошок, стряхиваемый с поверхности фильтрующих элементов, попадает в сборную емкость, расположенную под фильтрующими элементами. Собранный системой рекуперации порошок может повторно использоваться в процессе порошковой окраски. Установленная мощность фильтра 11 кВт, объем отсасываемого воздуха 10 000 м³/ч. Среднее время смены краски 20 мин.

Установку для подготовки поверхности изделий струйным способом перед их покрытием порошковыми красками. Установка состоит из камеры подготовки поверхности тупикового типа периодического действия, трех ванн для растворов, электрокалорифера, бака-отстойника для обезжиривающего раствора и щита управления. В одной камере последовательно осуществляются следующие стадии технологического процесса: обезжиривание с одновременным фосфатированием, две промывки, сушка горячим воздухом с температурой 110 °С в течение 10 мин. Все технологические операции осуществляются в автоматическом режиме. Габаритные размеры установки подготовки поверхности 3240 × 5000 × 5000 мм, масса 6,4 т.

Пневматическое вибросито ВС-1 для просеивания порошковой краски с целью очистки ее от посторонних примесей. Оно состоит из стойки, бункера вместимостью 35 л, вибросита с вибратором (размер ячеек 300 мкм),

регулятора давления с манометром. Вибросито работает на очищенном и осушенном сжатом воздухе (режим работы длительный) при давлении 0,2—0,4 МПа, температуре окружающей среды 15—35 °С и относительной влажности до 80 %. Может работать во взрывоопасных зонах класса В-Па. Габаритные размеры вибросита 520 × 450 × 1200 мм, масса 20 кг.

Робот-манипулятор РМ-2000 для комплектации автоматических установок окраски методом порошкового напыления. Он предоставляет возможность автоматического вертикального возвратно-поступательного перемещения распылителей и состоит из стойки с электроприводом мощностью 1 кВт, рук для крепления распылителей. Их рабочий ход ограничен концевыми выключателями и составляет 3400 мм, скорость перемещения рук манипулятора 0,05—1,00 м/с. Управление роботом-манипулятором осуществляется от электронного блока управления. Максимальная масса перемещаемого полезного груза 15 кг. Высота стойки робота-манипулятора 3400 мм, площадь в плане 600 × 1000 мм, масса 250 кг.

ООО "Современная лакокрасочная компания" (Москва) предложило свою продукцию для предприятий машиностроения.

Грунтовку ЭП-0259 для антикоррозионной защиты различных металлических деталей и приборов, подвергающихся воздействию промышленной атмосферы. Грунтовка обладает стойкостью против воздействия воды, соляных и щелочных растворов, масел и бензина. Она обеспечивает хорошее проникновение в структуру поверхности, повышает адгезию водно-дисперсионных, масляных красок, эмалей и др., увеличивает атмосферо- и водостойкость. Время высыхания 3 ч при температуре 20 °С.

Эмаль ХП-7120 для защиты наружных поверхностей конструкций из металла, подвергающихся атмосферным воздействиям в условиях умеренного, холодного и тропического климата. По словам разработчиков, такая эмаль не теряет свои свойства в течение 10 лет. Массовая доля нелетучих веществ в эмали 27 ± 2 %, время высыхания при температуре 20 °С не более 3 ч.

ЗАО "Константа" (С.-Петербург) демонстрировало на выставке приборы неразрушающего контроля различного назначения.

Индукционный толщиномер "Константа МК4-ИДЗ" для оперативного

определения толщины лакокрасочных, гальванических, порошковых и других покрытий на изделиях из ферромагнитных металлов. Наличие матричного индикатора облегчает общение с прибором в процессе работы. Он оснащен встроенным аккумулятором и внешним зарядным устройством, диапазон измерения 0—2000 мкм при погрешности $\pm 0,021$ мкм. При полной зарядке аккумулятора толщиномер производит до 60 000 измерений. Габаритные размеры толщиномера 95 × 45 × 20 мм.

Вихревой толщиномер "Константа МК4-ГДЗ" для оперативного определения толщины лакокрасочных, порошковых и других диэлектрических покрытий на изделиях из электропроводящих неферромагнитных металлов и алюминиевых, медных и других сплавов. Он также оснащен матричным индикатором и встроенным аккумулятором. Диапазон измерения 0—30 мм при погрешности 0,021 мкм. При полной зарядке аккумулятора толщиномер производит до 60 000 измерений. Габаритные размеры толщиномера 95 × 45 × 20 мм.

Толщиномер-колесо мокрого слоя краски "Константа-МС1" (рис. 1) для оперативного измерения толщины влажных неотвердевших лакокрасочных покрытий на плоских и цилиндрических изделиях с целью оценки окончательной толщины покрытия после его полимеризации. Толщиномер работает следующим образом. Колесо устанавливается на окрашенную по-

верхность, прокатывается по мокрому слою краски. Толщина покрытия определяется по окончанию следа краски на измерительном колесе относительно отметки зазора на опорных колесах. Отличительная особенность толщиномера — центральное измерительное колесо, закрепленное с эксцентриситетом, равным диапазону измерения (0—200 или 0—500 мкм при погрешности измерения 5 %), относительно двух опорных колес с нанесенными отметками зазоров. Диаметр измерительного колеса 50 мм. Расстояние между опорными колесами 9 мм.

Электроискровой дефектоскоп "Корона 2.2" для контроля трещин, пористости, недопустимых утончений и других нарушений сплошности защитных покрытий трубопроводов диаметром до 1500 мм с использованием специальных пружинных электродов и покрытий толщиной до 12 мм, применением импульсного высоковольтного напряжения и фиксацией электрического пробоя в местах нарушения сплошности. За счет импульсного режима работы дефектоскоп безопасен при эксплуатации. Оснащен большим набором сменных электродов пружинного типа для контроля изделий различного назначения, а также дисковых электродов для контроля покрытий в трубах диаметром 89—1020 мм, длиной до 14 м. Диапазон регулирования напряжения на электроде 5—40 кВ, время непрерывной работы от полностью заряженного аккумулятора 6 ч.

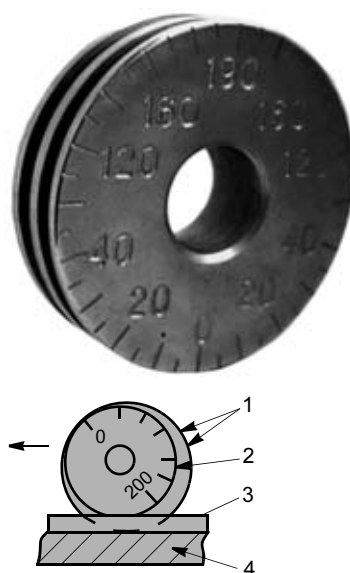


Рис. 1. Толщиномер-колесо мокрого слоя краски "Константа-МС1": 1 — два опорных колеса; 2 — измерительное колесо; 3 — покрытие; 4 — основание

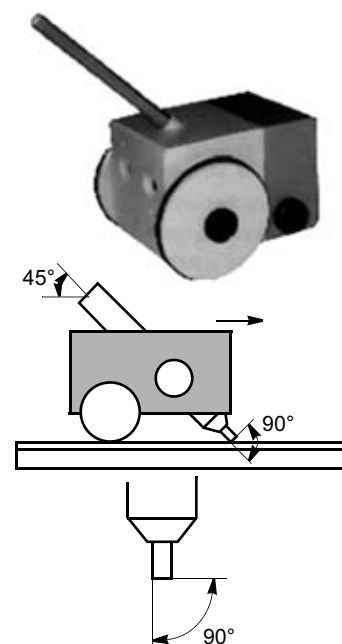


Рис. 2. Твердомер "Константа-ТК"

Твердомер "Константа-ТК" (рис. 2) для определения твердости покрытий при царапании по ним грифелем карандаша. Метод основан на царапании покрытия графитовым стержнем, заточенным под углом 90° к его оси. Карандаш с варьируемой твердостью перемещается по покрытию с фиксированным нажимом 7,6 Н под углом 45° к поверхности. Твердость карандаша, который повредит поверхность, и принимают за измеренное значение твердости покрытия. Габаритные размеры тележки твердомера $140 \times 140 \times 140$ мм, масса 0,9 кг.

Глубиномер "Допуск С-3" (рис. 3) для оперативного контроля глубины очаговой коррозии и глубины узких отверстий и пазов. Диапазон измерения глубиномера 0,05—8,00 мм с погрешностью $\pm 0,05$ мм. Он прост по конструкции и надежен в работе, габаритные размеры $40 \times 60 \times 40$ мм, масса 0,25 кг.



Рис. 3. Глубиномер "Допуск С-3"

ООО "Научно-производственная фирма "Спектр-Лакокраска" (Москва) представило на выставке эмали, применяемые в машиностроении.

Эмаль ХС-5146 различных цветов для антикоррозионной защиты металлических поверхностей из стали, алюминиевых и титановых сплавов, пред-

варительно загрунтованных грунтовкой АК-070. Эмаль представляет двухкомпонентную систему, состоящую из полуфабриката эмали и отвердителя, смешиваемых перед применением. Содержание нелетучих веществ в черной эмали 23—29 %, других цветов — 21—27 %. Время ее высыхания при температуре 60°C не более 2 ч, при температуре 20°C — не более 24 ч. Рекомендуемая толщина двухслойного покрытия 45 мкм.

Эмаль ЭП-5287 различных цветов для защитно-декоративной окраски поверхностей из стали, алюминиевых и титановых сплавов, чугуна и бетона без предварительного грунтования. Покрытие обладает стойкостью против стирания и термостойкостью. Эмаль наносят методами пневматического и безвоздушного распыления, кистью или валиком. Ее срок службы при соблюдении технологии окрашивания 12 лет.

Компания "Торус" (Казань) продемонстрировала оборудование для нанесения порошковых полимерных покрытий.

Лабораторную камеру "Торус ЛК-50" (рис. 4) для напыления порошковых красок на небольшие детали на производстве и в производственных лабораториях при отработке технологических режимов нанесения и тестирования порошковых красок. Камера оснащена пультом управления со встроенным регулятором давления сжатого воздуха и кнопками включения вытяжки, освещения и компрессора. Камера укомплектована пылесосом с циклоническим фильтром (для удобства сбора краски) и обдувочным пистолетом. Небольшая масса камеры и стойка на колесных опорах позволяют перемещать ее внутри помещения.

Трибозараспылитель "Торус-Т600" для окрашивания деталей особо сложных форм, содержащих глубокие полости и труднодоступные углы. Трибозаряжающий элемент, выполненный в виде съемного ствола, имеет небольшие габаритные размеры $350 \times 280 \times 85$ мм



Рис. 4. Лабораторная камера "Торус ЛК-50"

и обладает достаточной эффективностью при работе. Замена ствола осуществляется в течение нескольких секунд. Возможна комплектация распылителя различными насадками для получения факела необходимой формы. Питающее напряжение распылителя 220 В, потребляемая мощность 10—30 Вт в зависимости от блока питания. Скорость окрашивания до $1 \text{ м}^2/\text{мин}$. Масса распылителя 0,7 кг.

В рамках выставки был организован международный специализированный салон "Обработка поверхности, защита от коррозии", в котором приняли участие компании из многих стран, а также прошли научно-практические конференции: "Лакокрасочная промышленность сегодня: инновации, качество, рынок", "Защита от коррозии — покрытия и технологии".

А. Н. ИВАНОВ, инж.

Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 30.06.2008. Подписано в печать 18.08.2008. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.-печ. л. 10,00. Уч.-изд. л. 11,53. Заказ 09/08.

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"