



ТЕХНОЛОГИЯ

МАШИНОСТРОЕНИЯ

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

**РЕДАКЦИОННАЯ
КОЛЛЕГИЯ:**

Гл. редактор

В. А. Казаков

Зам. гл. редактора

Н. В. Посметная

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

Редакция:

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

Компьютерная верстка:

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

Т. В. Арбузова

**9 (63)
Сентябрь
2007**

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Издательский центр

"Технология машиностроения"

Журнал издается при содействии

Министерства промышленности

и энергетики РФ,

Министерства образования и науки РФ,

Российской инженерной академии,

Российского научно-технического

общества машиностроителей,

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

Адрес для корреспонденции:

129626, Москва, а/я 01

Контактный тел.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru

(с пометкой для журнала

"Технология машиностроения")

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-7779

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

*Перепечатка материалов из журнала "Технология машиностроения" возможна
при обязательном согласовании с редакцией журнала*

*При перепечатке материалов ссылка
на журнал "Технология машиностроения" обязательна*

СОДЕРЖАНИЕ

Петров А. П. — "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского — 75 лет.	5
КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ	
Рыбин А. А., Бухаров С. В., Червяков А. А. — Механические свойства полиарилата и поликарбоната при динамических скоростях деформации.	7
ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	
Смыков А. Ф., Моисеев В. С., Неуструев А. А. — Автоматизированное проектирование средств воздействия на формирование однородной структуры литых турбинных лопаток.	9
ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ	
Петров А. П., Галкин В. И., Палтиевич А. Р. — Особенности применения конечно-элементного анализа процессов обработки металлов давлением и перспективы прогнозирования структуры и свойств изделий.	12
МЕХАНОСБОРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО	
Бахвалов Ю. О. — Методология интегрирования композиционных корпусных элементов в конструкцию ракет.	15
Самсонов О. С. — Моделирование процессов конструкторско-технологического проектирования сборки летательных аппаратов	18
ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ	
Сидякин В. А. — Технология и оборудование стыковой сварки дугой низкого давления трубных переходников из разнородных металлов	27
ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН	
Ильин А. А., Спектор В. С., Сарычев С. М., Плихунов В. В., Петров Л. М., Иванчук С. Б. — Вакуумные ионно-плазменные технологии и перспективы их применения в машиностроении	33
Лозован А. А., Щитов Н. Н. — Оптимизация процесса разработки вакуумных наноградиентных покрытий.	36
СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ	
Барабанова О. А., Могорычный В. И., Полунин В. А. — Повышение качества теплообменной техники для криогенных систем	40
Ильин А. А., Мамонов А. М., Карпов В. Н., Петров Л. М., Овчинников А. В. — Комплексные технологии создания износостойких высоконагруженных компонентов эндопротезов крупных суставов из титановых сплавов	43
ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ	
Шевченко И. В., Логвиненко Н. В. — Метод тепловизионного контроля тепловых характеристик охлаждаемых лопаток газовых турбин	47
Ковалев А. П. — Оценка несущей способности поверхностного слоя деталей вдавливанием сферического индентора	50
Агамиров Л. В., Агамиров В. Л. — О едином подходе к оценке характеристик механических свойств при статических и циклических испытаниях	53
АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ	
Бахвалов Ю. О., Агамиров Л. В. — Моделирование напряженно-деформированного состояния интегрированных элементов конструкции ракеты-носителя	58
Болоненко С. А., Захаров С. А., Овчинников И. А., Попов Е. Н. — Применение САПР Solid Works и CAE-системы Cosmos Works для компьютерных испытаний и оптимизации конструкций приборов систем управления летательных аппаратов	61
СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА	
Новиков В. А., Яшин А. Н. — Измерения в системах менеджмента качества организаций	64
Васильев В. А. — Проблемы управления качеством в российской промышленности.	69
ОХРАНА ТРУДА И ЭКОЛОГИЯ	
Молчанова И. В., Двоскин Г. И., Соседов Е. А., Чивикина Г. И. — Экологически чистая утилизация твердых отходов в маломасштабных установках ЭЧУТО	72
ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	
Голов Р. С. — Конкурсные закупки как барьер реализации потенциала энергосбережения в бюджетной сфере	74
Федоров В. К., Бендерский Г. П., Белевцев А. М. — Методы технологического дизайна в структуре инновационных процессов в машиностроении.	77
Клапцова Т. С. — Математическая модель деятельности операторов при решении гомеостатической задачи управления	81
Аносенко А. В., Смирнов Н. Я. — Предпосылки и проблемы повышения устойчивости функционирования систем информационной поддержки процессов принятия решений в экстремальных ситуациях	86
Островец А. И., Цыркв А. В. — Интеллектуальная среда системы подготовки производства.	92
ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ	
Сухов С. В. — Конкурентоспособность образовательной системы вуза	97



TEKHNLOGIYA

MASHINOSTROENIYA

REVIEW-ANALYTICAL, SCIENTIFIC-TECHNICAL
AND PRODUCTION JOURNAL

EDITORIAL BOARD:

V. A. Kazakov
Editor-in-Chief

N. V. Posmetnaya
Deputy Editor-in-Chief

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

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

Computerized making-up:
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
T. V. Arbuzova

9 (63) September 2007

FOUNDER:

Publishing Centre

"Tekhnologiya Mashinostroeniya"

Journal is published in collaboration
with RF Ministry of Industry and Energetics,
RF Ministry of Education and Science,
Russian Engineering Academy,
Russian Scientific-Technical Society
of Machine Builders,
TSNIITMASH, JSC

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

Tel.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru
(marked for journal)

"Tekhnologiya Mashinostroeniya"
[Http://www.tm.folium.ru](http://www.tm.folium.ru)

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

Registration certificate ПИ № 77-7779

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

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

Reference to "Tekhnologiya Mashinostroeniya"
at reprint is obligatory

CONTENTS

Petrov A. P. — The 75 th anniversary of the "MATI" — Tsyolkovsky RGTU	5
STRUCTURAL MATERIALS	
Rybin A. A., Bukharov S. V., Chervyakov A. A. — Mechanical properties of the polyarilate and polycarbonate at friction rate of deformation	7
BLANK PRODUCTION	
Smykov A. F., Moiseyev V. S., Neustruyev A. A. — Lever computer-aided design for turbine cast blade homogeneous structure formation	9
FORMING TECHNOLOGIES	
Petrov A. P., Galkin V. I., Paltiyevich A. R. — Application characteristic properties of the metal forging finite element analysis and prospects of forecasting products structure and properties	12
MACHINING-AND-ASSEMBLY PRODUCTION	
Bakhvalov Yu. O. — Methodology of composite body components integration into rocket construction	15
Samsonov O. S. — Construction engineering design modelling of flying vehicles assembling	18
PERMANENT JOINTS PRODUCTION TECHNOLOGY	
Sidyakin V. A. — Low pressure butt-seam arc welding practice and equipment for adapting pipes from dissimilar metals.	27
MODIFEING PROCESSES OF MACHINE PARTS SURFACES	
Ilin A. A., Spektor V. S., Sarychev S. M., Plikhunov V. V., Petrov L. M., Ivanchuk S. B. — Vacuum ion-plasma technologies and prospects of their application in the engineering industry	33
Lozovan A. A., Schitov N. N. — Optimization of the vacuum nano-gradient coatings development.	36
SPECIAL TECHNOLOGIES	
Barabanova O. A., Mogorychny V. I., Polunin V. A. — Upgrading heat-exchange equipment for the cryogenic systems	40
Ilin A. A., Mamonov A. M., Karpov V. N., Petrov L. M., Ovchinnikov A. V. — Integrated technology of creating wear-resistant high-loaded components for large joint implants from titanium alloys	43
TECHNICAL DIAGNOSTICS, NONDESTRUCTIVE CHECK-AND-TESTING METHODS	
Shevchenko I. V., Logvinenko N. V. — Method of thermal imaging monitoring of the gas turbine cooled blades heat properties	47
Kovaliov A. P. — Estimation of the surface layer bearing strength of a component by pressing in a spherical indenter.	50
Agamirov L. V., Agamirov V. L. — On the unified approach to evaluate mechanical properties at static and cyclic tests	53
PROCESSES AUTOMATION AND COMPUTERIZATION	
Bakhvalov Yu. O., Agamirov L. V. — Simulation of the launcher integrated construction member deflected mode	58
Bolonenko S. A., Zakharov S. A., Ovchinnikov I. A., Popov Ye. N. — Solid Works CAD and Cosmos Works CAE-systems application for computer tests and optimization of the flying vehicle guidance device construction	61
STANDARDIZATION, CERTIFICATION, QUALITY SYSTEMS	
Novikov V. A., Yashin A. N. — Measurements in the quality management system of an organization.	64
Vasiliyev V. A. — Problems of quality management in the Russian industry	69
LABOUR PROTECTION AND ECOLOGY	
Molchanova I. V., Dvoskin G. I., Sosedov Ye. A., Chivikina G. I. — Pollution-free recycling of solid waste in the "ECHUTO" small-scale plant.	72
ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION	
Golov R. S. — Formal advertising as a barrier to realization of energy-saving potential in budgetary scope.	74
Fiodorov V. K., Bendersky G. P., Belevtsev A. M. — Methods of technological design in the structure of innovative processes in engineering industry.	77
Klaptsova T. S. — Human being as an optimal unit of a follow-up system	81
Anosenko A. V., Smirnov N. Ya. — Prerequisites for and problems of upgrading functioning stability for the extreme-decision-making information support system	86
Ostroverkh A. I., Tsyrvov A. V. — Intellectual medium of the preproduction system	92
EDUCATION AND PERSONNEL TRAINING	
Sukhov S. V. — Competitive strength of the higher institutions educative system.	97



В 2007 г. исполняется 75 лет со дня основания "МАТИ" — Российского государственного технологического университета им. К. Э. Циолковского. За годы своей истории МАТИ прошел сложный, творческий и неординарный путь от Дирижаблестроительного учебного комбината до современного многопрофильного технологического университета.

История МАТИ неразрывно связана со становлением отечественного авиационно-ракетного комплекса. Наш университет был основан как высшее учебное заведение Дирижаблестроительный учебный комбинат (ДУК), а позднее в Московский дирижаблестроительный институт с целью обеспечения инженерными кадрами дирижаблестроительной отрасли промышленности. Именно тогда была заложена традиция развития МАТИ — заниматься подготовкой кадров, крайне востребованных промышленностью и экономикой страны, постоянно отслеживая актуальность специальностей подготовки и поддерживая связь с ведущими предприятиями-партнерами. В конце тридцатых годов авиационная промышленность была переориентирована на производство самолетов. В связи с этим в 1939 г. вуз был преобразован в Московский институт инженеров гражданского воздушного флота им. К. Э. Циолковского. Однако вскоре стало понятно, что в самолетостроении даже самые гениальные конструкторские идеи обречены на провал без соответствующих технологических решений, обеспечивающих в процессе производства качество и надежность выпускаемой продукции. Фактически технология выделилась в самостоятельную область инженерной дея-

тельности. В связи с этим институт был ориентирован на подготовку именно инженеров-технологов и в 1940 г. получил название Московский авиационный технологический институт (МАТИ).

Новые технологии, разработанные учеными и студентами МАТИ, из научных лабораторий немедленно внедрялись на оборонных заводах, а работники этих предприятий приходили после смены учиться в МАТИ. Вечернее отделение МАТИ было открыто в 1944 г. И такое взаимодействие с промышленностью в направлениях образовательного процесса, активного внедрения научных разработок, повышения квалификации кадров, гибкой переориентации структуры и специальностей вуза на решение наиболее актуальных задач прослеживается на всех этапах истории МАТИ.

В 50-х годах активно создаются филиалы МАТИ при ведущих предприятиях авиационной отрасли: Раменском приборостроительном заводе (1954 г.), Ступинском металлургическом комбинате (1956 г.), заводе № 156 Министерства авиационной промышленности (1957 г.). За студенческую скамью садятся руководители среднего звена авиационной промышленности, чтобы потом, будучи матийцами по образованию и духу, прославить своими технологическими разработками и "alma mater" — МАТИ, и свою Родину — первую в мире космическую державу. В октябре 2007 г. — полувековой юбилей запуска в космос первого спутника Земли, в этом же году отмечали 45-летие полета Ю. А. Гагарина. Во всех этих событиях неперенные действующие лица — выпускники МАТИ.

Вечерние филиалы МАТИ при крупнейших базовых предприятиях — ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, ФГУП ММП "Салют", ОАО "Раменский приборостроительный завод" — существуют до сих пор. При этом наши выпускники определяют техническую политику отрасли, являясь руководителями высшего звена таких предприятий, как ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, Национального института авиационных технологий, АК им. С. В. Ильюшина, ОАО "Компания Сухой", КБ "Химмаш им. И. М. Исаева", Завода экспериментального машиностроения РКК "Энергия" им. С. П. Королева, ОАО "РПЗ", ВИАМ и др.

В начале 60-х годов радиоэлектронная аппаратура стала неотъемлемой составной частью навигационного комплекса летательного аппарата, нашла применение при автоматизации производственных процессов.

Промышленность испытывала потребность в технологах по радиоэлектронике, микроэлектронике. В 1962 г. в МАТИ был открыт факультет радиоэлектронной аппаратуры, выпускающий инженеров в области технологии производства приборов и систем управления летательных аппаратов и радиоэлектронной аппаратуры.

В 1992 г. МАТИ одним из первых технических вузов получил статус университета. С тех пор наш университет неоднократно подтверждал этот статус, проходя государственную аттестацию, аккредитацию и лицензирование. В апреле 2007 г. была проведена очередная комплексная проверка и МАТИ вновь был аттестован на право ведения образовательной деятельности как университет.

Переход отечественной экономики на рыночные отношения потребовал подготовки кадров, хорошо владеющих знаниями и навыками организации и ведения производства в современных условиях. В связи с этим в 1994 г. несколько кафедр были объединены в экономический факультет, осуществляющий выпуск специалистов в области организации производства, менеджмента, маркетинга, управления качеством, экологии.

90-е годы XX века стали началом стремительной компьютеризации всех областей человеческой деятельности. Возникла необходимость разработки и внедрения информационных технологий в сферу производства. В университете на многих кафедрах появились направления и специальности, связанные с информационными технологиями, разработкой систем автоматизированного проектирования технологических процессов, CALS-технологиями. В 2000 г. на базе факультета радиоэлектронной аппаратуры создан факультет "Информационные системы и технологии".

В 90-е годы система воспитательной работы с молодежью была разрушена, но в МАТИ традиции воспитательной работы, студенческого самоуправления не только не растеряли, но и развивали. Фундаментом стала идеология социального партнерства студентов и преподавателей, объединяющая всех в патриотическом отношении к своему вузу. В итоге в 2004 г. в МАТИ был открыт "Институт молодежной политики и социальных технологий" (ИМПЛиСТ) на правах факультета, осуществляющего подготовку по специальностям и направлениям, связанным с работой с молодежью, государственным и муниципальным

управлением, управлением персоналом. Воспитательная внеаудиторная работа со студентами под руководством ИМПИСТА стала осуществляться на профессиональном уровне.

МАТИ гордится своей историей. В университете есть свой музей, который студенты посещают целыми группами. К 75-летию юбилею вуза подготовлен к изданию второй том "История МАТИ", охватывающий период с 1960 по 2000 г., в университете есть ежегодный праздник "День рождения МАТИ", который студенческим профкомом проводится по инициативе студентов.

В настоящее время МАТИ из отраслевого института превратился в многопрофильный университет. Фактически история МАТИ — это постоянное развитие в направлении обеспечения потребностей промышленности, экономики и общества в высокопрофессиональных кадрах, научных разработках, современных технологиях.

Научная деятельность осуществляется в рамках пяти основных направлений, соответствующих структуре подготовки специалистов в университете, и базируется на "Приоритетных направлениях развития науки и техники Российской Федерации" и "Критических технологиях Российской Федерации". Университет принимает участие в 39 крупных целевых программах: "Развитие научного потенциала высшей школы", "Университеты России", "Конверсия и высокие технологии", "Перспективные материалы", "Производственные технологии", "Транспорт", "Индустрия образования", "Качество и безопасность", "Интеграция" и др.

В период 2002—2006 гг. учеными университета получены более 175 грантов различного уровня, в том числе международных. Прикладные исследования и разработки в основном выполняются в рамках НТП Министерства образования и науки РФ и других министерств и ведомств. Ежегодно заключается 50—90 договоров с предприятиями и организациями. Партнерами университета являются ФГУП ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, ФНПЦ "Салют", ИЛАМ им. Баранова, ОАО "ОКБ Сухого", ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ, ОАО "ВИЛС", НПО "Авионика", АНТК им. Туполева, ФГУП "ЦКБ ТМ", ОАО "Композит", НИИ точных приборов, ОАО "РКК "Энергия" им. С. П. Королева, ОАО НПО "ЦНИИМАШ", ИМЕТ им. А. А. Байкова РАН, ФГУП "ЦАГИ им. проф. Н. Е. Жуковского", Фонд "МиТОМ", ЗАО "Имплонт МТ", Роскос-

мос и его предприятия, МКНТ, Министерство обороны и его заказывающие управления и организации, а также коммерческие предприятия и организации.

В настоящее время в университете функционируют 13 проблемных и научно-исследовательских лабораторий, в том числе одна студенческая. В университете работают инновационно-технологический центр (ИТЦ) и технопарк МАТИ, а в 2005 г. в целях интенсификации инновационной деятельности университета создан Учебно-научно-производственный инновационный комплекс МАТИ (УНПИК МАТИ). В настоящее время в него входят кафедры трех факультетов и семи динамично развивающихся малых предприятий, основу которых составляют молодые энергичные люди — ученые, аспиранты и выпускники МАТИ. Опираясь на материально-техническую базу и научные кадры университета, плодотворно работает ФГУП "НИЧ МАТИ", с которым университет заключил договор о совместной научной и инновационной деятельности. Полученные в ходе выполнения НИР научные результаты широко используются в дипломном проектировании, лекционных курсах и при выполнении курсовых проектов и лабораторных работ.

Университет ежегодно организует и проводит научно-технические конференции "Новые материалы и технологии", "Международный аэрокосмический конгресс", молодежную конференцию "Международные Гагаринские чтения", научно-технические семинары "Водородная технология", "Экология" и ряд постоянно действующих кафедральных научно-технических семинаров. Начиная с 2002 г. организованы и ежегодно проводятся новые научно-технические конференции "Управление качеством", "Применение ИПИ-технологий в производстве", "Быстрозакаленные материалы и покрытия". В 2005 г. проведены юбилейный конгресс, посвященный 10-летию международного фонда попечителей МАТИ, и региональная молодежная конференция "XXI век в оценке студенчества: проблемы, ожидания, перспективы". В последние годы университет на своей территории проводит до 12 различных конференций ежегодно.

В университете ежегодно издаются сборники трудов научных конференций, а также сборники "Научные труды МАТИ" и "Научно-методические труды МАТИ". Результаты научных исследований представлены в широком спектре печатных изданий

в стране и за рубежом, материалах различных научно-технических конференций. Только за последние пять лет опубликованы более 1300 научных статей, в том числе более 100 в зарубежных изданиях, подготовлены около 4000 докладов, из которых более 250 представлены на международных конференциях, изданы более 170 монографий. В течение 2002—2006 гг. разработки ученых МАТИ были представлены на более чем 200 выставках, в том числе более 50 международных. Только в 2005 г. разработки МАТИ участвовали в 62 выставках, из которых 30 международных: Международный авиационно-космический салон "МАКС—2005", Международная выставка-презентация совместных проектов Москвы и Баварии на заседании комитета регионов Евросоюза (Бельгия), Международная выставка "Космическая медицина и биотехнологии" (Германия), международные выставки "Дни экономики Москвы" (Германия), XXXIII Международный салон изобретений новой техники и изделий "Женева—2005" и др. Экспонаты МАТИ были отмечены многочисленными наградами, дипломами, медалями и т. д.

Приоритетной задачей университета является подготовка кадров высшей квалификации, которая в рамках МАТИ проводится по 5 отраслям науки и 37 научным специальностям. Для этого в университете действует девять диссертационных советов. С 2002 по 2006 гг. в диссертационных советах МАТИ защищены 38 докторских диссертаций. За этот период в докторантуре МАТИ прошли обучение 12 человек, из них пять с защитой диссертаций. В настоящее время в докторантуре обучаются семь человек. На данный момент численность аспирантов составляет 397 человек, из них 343 очного обучения. За указанный период в диссертационных советах МАТИ защищены 209 кандидатских диссертаций.

Наш университет — коллектив высококвалифицированных преподавателей и сотрудников, преданных многолетним традициям МАТИ, многотысячный отряд студентов и аспирантов, приобщающийся к этим традициям. Университет был и остается одним из ведущих вузов страны. Отмечая свое 75-летие, наш коллектив уверенно смотрит в завтрашний день.

А. П. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, ректор "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

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

Механические свойства полиарилата и поликарбоната при динамических скоростях деформации

Показатели механических свойств промышленных полимерных материалов при скоростях деформации $\dot{\varepsilon} = 10 \div 10^3 \text{ с}^{-1}$ необходимы специалистам широкого круга при проведении практических работ по конструктивной и технологической обработке полимерных изделий для эксплуатационных условий различного типа ударных нагрузок.

В данной работе приведены результаты исследования динамических свойств следующих термопластичных материалов: полиарилата ДВ-105 (ТУ6-05-221-422—80); полиарилата ДВ-342 (ТУ6-05-221-669—83); ДВ-105 + 3 % фторопластовых микрочастиц поликарбоната ПК-2 (ТУ6-05-1668—80).

Образцы данных материалов призматического типа размером $12 \times 6 \times 4$ мм испытывали на одноосное сжатие со скоростью деформации $\dot{\varepsilon} \sim 250 \text{ с}^{-1}$ по методикам, приведенным в работах [1, 2]. Обработку результатов измерений динамического отклика образцов на ударное воздействие волноводным ударником проводили по разработанной методике, позволяющей одновременно вычислять и традиционные предельные деформационно-прочностные параметры динамических свойств материалов [1], и аналогичные параметры, соответствующие уровню деформаций, когда возникает резкая активация очагов множественного дилатонного разрушения практически по всему объему испытываемого материала [2, 3]. Согласно современным представлениям, опасный уровень активации множественных дилатонов [3], кластеризующихся в очаги быстро развивающихся микротрещин, возникает в условиях динамического нагружения к моменту достижения характеристического времени t_A . Обычно временной период t_A существенно меньше конечного времени функционирования образца под нагрузкой t_K . Введем определения принятых для анализа в пределах данной работы уровней параметров по напряжениям и энергоемкостям процессов деформирования материалов образцов:

σ_B — временное напряжение разрушения (предельная характеристика);

σ_A — напряжение экстремума dA/dt (уровень критического развития дилатонов);

dA/dt — экстремальное значение скорости поглощения энергии удара (определяется из экспериментальных диаграмм динамического импульса сопротивления образцов);

A_B — удельная энергоемкость к моменту t_K (деформационных процессов материала);

A_A — удельная энергоемкость к моменту t_A (временная точка достижения экстремума dA/dt).

Перечисленные параметры, определенные для рассматриваемых материалов в температурном диапазоне от 213 до 353 К, приведены для материалов ДВ-105, ДВ-342, ПК-2 в табл. 1—3 соответственно. Отдельно исследовали характеристики поликарбоната ПК-2

(см. табл. 3) и влияние условий ускоренного климатического старения на традиционные предельные параметры и на реальные характеристики перенапряженных дилатонных структур в полимерах. При испытаниях на старение применяли стандартные режимы выдержки образцов ПК-2 в климатической камере КРК-022 при длительностях до 70 дней. Результаты ударных испытаний образцов, подвергнутых климатическому старению, систематизированы в табл. 4.

Таблица 1

Температура испытания, К	σ_B , МПа	σ_A , МПа	$(dA/dt)10^{10}$, Дж/(м ³ ·с)	$\bar{A}_B 10^7$, Дж/м ³	$A_A 10^7$, Дж/м ³
213	—	—	—	—	—
298	120,6	175,6	(350 мкс) 4,6136	4,5333	1,0333
313	112,2	155,6	(393 мкс) 4,0727	4,1667	1,0833
333	121,1	147,2	(500 мкс) 3,8503	4,0833	1,3000
353	107,2	126,1	(508 мкс) 4,0455	4,8666	1,4500

Таблица 2

Температура испытания, К	σ_B , МПа	σ_A , МПа	$(dA/dt)10^{10}$, Дж/(м ³ ·с)	$\bar{A}_B 10^7$, Дж/м ³	$A_A 10^7$, Дж/м ³
213	205,0	230,0	(143 мкс) 6,3909	1,7778	0,5944
298	137,8	156,7	(391 мкс) 4,2909	3,9444	1,1000
313	126,1	158,3	(367 мкс) 4,3636	4,3667	1,2000
333	116,1	141,7	(355 мкс) 3,8712	4,1667	0,9500
353	131,6	154,4	(423 мкс) 4,4318	4,9500	1,3000

Таблица 3

Температура испытания, К	σ_B , МПа	σ_A , МПа	$(dA/dt)10^{10}$, Дж/(м ³ ·с)	$\bar{A}_B 10^7$, Дж/м ³	$A_A 10^7$, Дж/м ³
213	158,3	213,3	(400 мкс) 5,9184	5,3333	1,7000
298	105,8	116,7	(500 мкс) 3,2925	4,0333	1,2000
313	78,3	78,8	(404 мкс) 2,3519	3,0444	0,6889
333	101,3	113,8	(437 мкс) 2,9636	4,1333	1,0333
353	63,1	67,5	(337 мкс) 1,6818	2,1083	0,4417

Таблица 4

Длительность старения, день	σ_B , МПа	σ_A , МПа	$(dA/dt)10^{10}$, Дж/(м ³ ·с)	$\bar{A}_B 10^7$, Дж/м ³	$A_A 10^7$, Дж/м ³
4	87,5	120,4	(360 мкс) 3,2653	3,5556	0,8222
10	83,8	111,7	(328 мкс) 2,9932	3,1111	0,6889
15	71,3	109,6	(359 мкс) 2,9660	3,0000	0,7556
30	109,2	136,7	(390 мкс) 3,6909	4,0333	1,0833
70	105,6	142,2	(370 мкс) 3,8915	4,2667	1,0167

Примечание. Температура испытания 298 К.

Табл. 1 и 2 дают сравнительную оценку свойств исходного полиарилата ДВ-105 и того же по химической структуре полимера, но модифицированного введением фторопластовых микрочастиц ДВ-342. Видно, что в температурном диапазоне 298—333 К существенные отличия по уровням динамических значений параметров σ_B и σ_A не выявлены. Существенные отличия по этим параметрам проявляются для этих материалов при повышенных температурах (353 К) и, как следует ожидать, при пониженных температурах (213 К). Энергетические параметры A_B и A_A также не обнаруживают существенных числовых различий. Примерно сходных значений достигают параметры максимальной скорости поглощения энергии ударного воздействия dA/dt . Наиболее важные проявления динамических свойств рассматриваемых материалов определяли следующим образом:

1. Для обоих типов полиарилатов характерно весьма существенное превышение критических уровней напряжений σ_A над временными разрушающими напряжениями σ_B во всем температурном диапазоне.

2. Почти идентичные уровни параметров A_A (критическое дилатонное насыщение) значительно быстрее достигаются при ударном сжатии у модифицированного полиарилата ДВ-342. Об этом свидетельствуют временные значения в колонках табл. 1 и 2, где приведены значения параметра dA/dt . Отмеченные различия характерны почти для всех температурных режимов испытаний образцов.

Практическую значимость выявленных особенностей изменения динамических параметров свойств полиарилата посредством модификации фторопластовыми частицами можно охарактеризовать следующим образом:

— при динамических режимах эксплуатации изделий из полиарилатов, характеризующихся повышенной интенсивностью воздействия, целесообразно применять полиарилат ДВ-342, для которого характерно ускоренное поглощение энергии воздействия;

— при анализе реальной работоспособности изделий из полиарилатов целесообразно ориентироваться на уровни достигаемых значений σ_A и A_A , отмечающихся в моменты t_A реальные значения силовых и энергетических характеристик материалов без активации дилатонно опасных состояний многих химических связей в полимерных молекулах. Значения σ_A и A_A , отмечаемые в моменты t_A , следует назначать как допустимые для эксплуатационных условий функционирования полимерных изделий.

Табл. 3 и 4 дают сравнительную оценку свойств исходного поликарбоната ПК-2 в температурном диапазоне 213—353 К и при температуре 298 К, но при различных длительностях ускоренного климатического старения. Влияние температуры испытания для поликарбоната весьма существенно. Все перечисленные в таблицах параметры свойств снижают свои значения в 2,0—2,5 раза при повышенных температурах 353 К. Следует отметить, что параметр скорости поглощения энергии dA/dt также двукратно снижается. Различия в соотносительных уровнях силовых параметров σ_B и σ_A почти не проявляются. Однако обратим особое внимание на факт значительно более низких уровней достигаемых значений параметров A_A в сравнении с соотносительными значениями предельных энергоемкостей A_B . Сопоставляемое числовое качество параметров σ_B и σ_A , A_B и A_A в данном случае

свидетельствует о принципиально иной кинетике активации дилатонных структур в поликарбонате по сравнению с таковыми в полиарилатах, в частности это обусловлено другой химической природой полимерных молекул.

Влияние длительности старения также характеризуется достаточно значительными изменениями в уровнях установленных испытаниями значений практически всех приведенных в табл. 4 параметров. Наиболее существенное занижение силовых и энергетических характеристик отмечается на длительностях от 4 до 15 дней. Начиная с длительности выдержки 30 дней параметры выходят на уровень параметров исходного ПК-2 при температуре 298 К. И для всего диапазона выдержки отчетливо наблюдается превышение параметра σ_A над σ_B ($\sigma_A > \sigma_B$). Параметр dA/dt относительно мало зависит от длительности выдержки старения. Предположительно можно утверждать, что основные изменения в химической и физической структурах поликарбоната возникают на начальных этапах его климатического старения. Далее развивающиеся процессы старения по крайней мере возвращают обсуждаемые параметры механических свойств на прежний уровень.

В целом же и для этого материала можно отметить значимость параметров σ_A и A_A для достоверной оценки доверительной работоспособности ПК-2 в изделиях, претерпевающих ударные эксплуатационные нагрузки.

ВЫВОДЫ

1. Специфические физические процессы в полимерах, на молекулярном уровне формирующие реальный отклик материалов на внешнее динамическое воздействие, можно учитывать с помощью системы оценочных параметров, дополняющих традиционные системы параметров оценки механических свойств материалов при динамических нагрузках.

2. Показана ведущая роль параметров σ_A , A_A , dA/dt , наиболее достоверно отмечающих реальную работоспособность материалов без катастрофического развития множественных разрывов химических связей в молекулах, на состояниях кластерной активации дилатонных зон.

3. Температурные условия контроля и переменные условия климатического старения влияют на достижимые уровни новых и традиционных параметров механических свойств промышленных полиарилатов и поликарбоната в условиях скоростного одноосного ударного сжатия. Выявлены принципиальные закономерности в проявлении соотносительных числовых уровней рассматриваемых групп оценочных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бухаров С. В., Рыбин А. А. Энергосиловая оценка предельных механических свойств волокнисто-наполненных полиамидов при ударных нагрузках сжатия // Технология машиностроения. 2006. № 8. С. 18—23.
2. Рыбин А. А., Бухаров С. В. Влияние волокнистого стеклонеполнителя на активацию очагов множественного дилатонного разрушения полиамида при ударном сжатии. Ч. 1 // Научные труды "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского. М., 2006. Вып. 10 (82). С. 64—68.
3. Петров В. А., Башкарев В. И., Веттегерьн В. И. Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. С.-Петербург: Политехника, 1993. 475 с.

А. Ф. СМЫКОВ, д-р техн. наук, В. С. МОИСЕЕВ, д-р техн. наук, **А. А. Неуструев**, д-р техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Автоматизированное проектирование средств воздействия на формирование однородной структуры литых турбинных лопаток

Образование в кристаллической структуре металла пера лопатки столбчатых кристаллов не допускается по техническим условиям их изготовления. Нарушение формирования однородной структуры связано с особенностями геометрии лопатки и увеличением интенсивности теплоотвода от нее в форму.

В соответствии с работами [1, 2], формирование однородной, равноосной структуры в затвердевающей отливке происходит при условии

$$\frac{G_L}{v_z} \leq m \frac{C_0}{D} \left(\frac{1-k}{k} \right), \quad (1)$$

где G_L — градиент температуры на фронте кристаллизации в жидкой фазе; v_z — линейная скорость затвердевания; m — тангенс угла наклона линии ликвидуса; C_0 — состав твердых растворов в соответствии с диаграммой состояния; D — коэффициент диффузии в жидкой фазе; k — коэффициент распределения.

Если в начале затвердевания отливки это условие не выполняется, то формируется столбчатая структура, а затем с уменьшением G_L — равноосная, т. е. однородность структуры не обеспечивается. Левую часть выражения (1) называют критерием однородности структуры, который можно определить также соотношением

$$Kgc = G_L^2 / v_{t1}; \quad (2)$$

где v_{t1} — скорость охлаждения отливки на фронте изоликидуса.

Правая часть выражения (1) определяется диаграммой состояний сплава и его свойствами и составляет критическое значение критерия Kgc , т. е. условие (1) можно записать следующим образом:

$$Kgc \leq (Kgc)_{кр}. \quad (3)$$

Величину $(Kgc)_{кр}$ для сплава или группы сплавов определяют экспериментально. В свою очередь, критерий Kgc , например, для жаропрочных сплавов типа ЖС6У и ЦНК-7, равен $5 \cdot 10^5$ — $5 \cdot 10^7$ К · с/м². При повышении Kgc необходимо изменять технологические режимы литья лопатки, что нередко оказывается недопустимым из-за возникновения других дефектов, связанных с нарушениями заполняемости формы, условий питания отдельных элементов отливки и др. Поэтому в ряде случаев задачу устранения неоднородности структуры решают комплексно. Например, чтобы избежать образования незаливов и неспаев, уменьшение температуры заливки расплава проводят с одновременным повышением начальной температуры формы. Или устранение неоднородности структуры с помощью тепловой изоляции участка отливки может нарушить последовательность ее затвердевания и непрерывность питания.

Обязательному контролю по макроструктуре подвергается участок пера около выходной кромки. По конструкции этот конусный участок пера может быть без внутренней полости и с полостью (рис. 1). Расчет формирования однородной структуры в этой части пера осуществляется на основе условия (3). Для этого конусный участок пера разделяют на две части I и II, одинаковые по длине ($x' = 0,5x$). Их размеры приведены в таблице.

Часть участка	Конструкция участка	Приведенный размер, м	Формула
I	Сплошной	$R_1 = 0,125(3y + y_k)$	(4)
	Полый	$R_1 = 0,125[3(y - y_s) + y_k - y_{sk}]$	(5)
II	Сплошной	$R_2 = 0,125(y + 3y_k)$	(6)
	Полый	$R_2 = 0,125[y - y_s + 3(y_k - y_{sk})]$	(7)

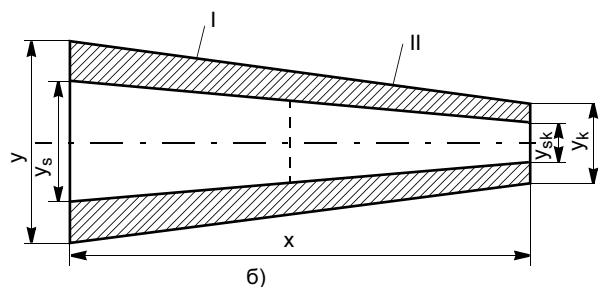
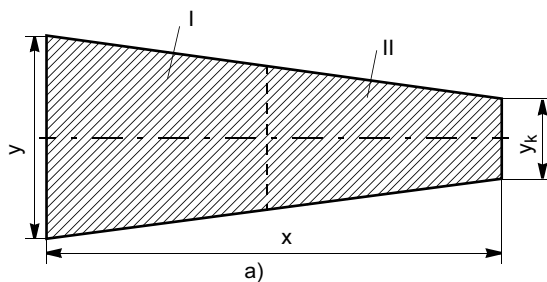


Рис. 1. Схемы сечений сплошного (а) и полого (б) конусных участков пера лопатки около выходной кромки

Если на выходной кромке пера выполняется технологический напуск, то u_k в формулах (6) и (7) увеличивается на толщину напуска. Расчет критерия K_{gc} выполняется по формуле (2), G_L определяется как средний градиент температуры в жидкой фазе перед фронтом изоликвидуса в части I конусного участка пера:

$$G_L = 2(T_1 - T_{лик})/x, \quad (8)$$

где T_1 — температура в части I в момент отвода перегрева в части II; $T_{лик}$ — температура ликвидуса сплава.

В свою очередь,

$$T_1 = T_{z1} - (T_{z1} - T_{фн})[1 - \exp(-2b_{ф}\sqrt{\tau_2/\pi}/(c'\rho'R_1))], \quad (9)$$

где T_{z1} — температура расплава в части I в конце заливки формы; $T_{фн}$ — исходная температура формы; $b_{ф}$ — коэффициент аккумулята теплоты формы; τ_2 — продолжительность отвода перегрева в части II; c' , ρ' — удельная теплоемкость и плотность жидкого сплава соответственно.

Величина v_{t1} определяется как средняя скорость охлаждения при отводе перегрева в части I:

$$v_{t1} = 2((T_{z1} - T_{лик})/\tau_1, \quad (10)$$

где τ_1 — продолжительность отвода перегрева в части I.

С учетом формул (2), (8)—(10) получим

$$K_{gc} = \frac{4\tau_1[(T_1 - T_{лик})/x]^2}{(T_{z1} - T_{лик})}. \quad (11)$$

Если в результате расчета окажется, что $K_{gc} > (K_{gc})_{кр}$, то формируется столбчатая структура. Для устранения неоднородной структуры пера лопатки обычно используют следующие приемы и технологические средства воздействия:

- уменьшение температуры заливки расплава или температуры печи подогрева форм перед заливкой;
- уменьшение начальной температуры формы за счет уменьшения температуры печи подогрева форм;
- дополнительную тепловую изоляцию формы на участке пера около выходной кромки при литье без предварительного подогрева форм (рис. 2, а);
- технологический напуск на торце выходной кромки (рис. 2, б);
- технологический элемент отливки в виде вертикального валика (или "карандаша") около выходной кромки пера (рис. 2, в).

На рис. 3 приведена блок-схема программы расчета однородности структуры около выходной кромки пера и выбора средств воздействия на формирование однородной структуры данного участка. Программу можно использовать как самостоятельно, так и в составе пакета программ проектирования технологических процессов литья лопаток. Большая часть исходных данных программы задается и рассчитывается при проектировании литниково-питающей системы [3, 4]. Кроме них, в зависимости от средства воздействия (код MS), вводят для дополнительной тепловой изоляции (MS = 1) ее толщину $\delta_{изд}$ (см. рис. 2, а); для технологического напуска (MS = 2) — толщину выходной кромки с напуском u_n и его ширину x_n (см. рис. 2, б); для "карандаша" (MS = 3) — расстояние ме-

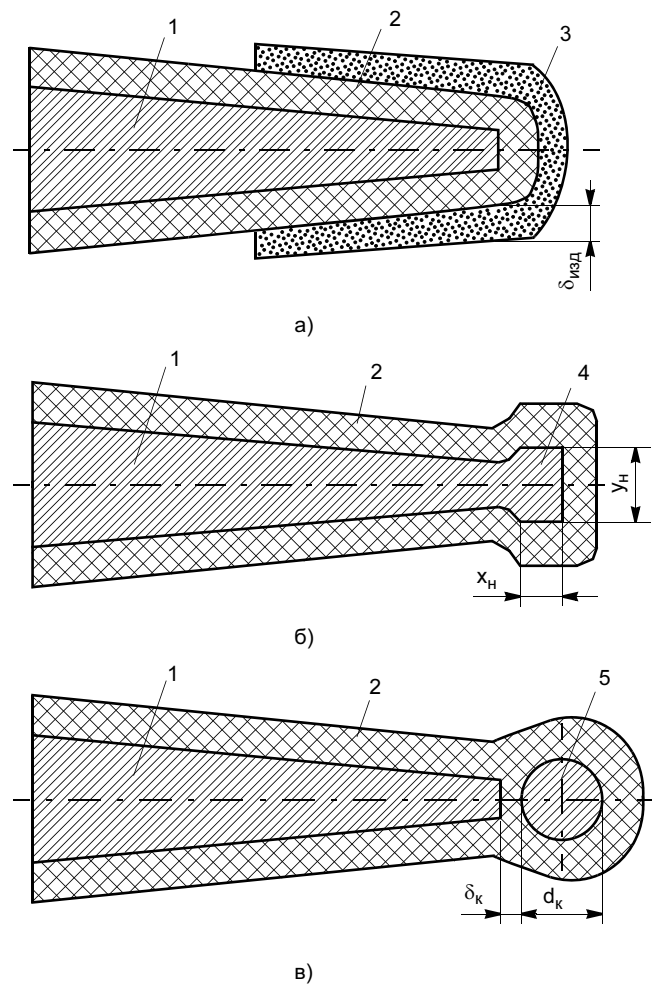


Рис. 2. Схемы конусного участка пера около выходной кромки с технологическими средствами воздействия: 1 — конусный участок пера лопатки; 2 — оболочка формы; 3 — тепловая изоляция; 4 — технологический напуск; 5 — "карандаш"

жду выходной кромкой и δ_k (рекомендуется не больше половины толщины оболочки формы) и его диаметр d_k (см. рис. 2, в).

В начале программы выполняется расчет K_{gc} для конусного участка пера без применения приведенных средств воздействия. Предварительно определяются приведенные размеры частей I и II конусного участка пера около выходной кромки (R_1 и R_2) с учетом наличия стержня (код STPk = 1), оформляющего его внутреннюю полость. Если окажется, что $K_{gc} > (K_{gc})_{кр}$, то выбирают одно из трех средств воздействия и расчет K_{gc} повторяют. В программе использованы три модуля расчета: исходной температуры формы $T_{фн}$ при ее заливке без предварительного подогрева, но закрытой теплоизоляционным чехлом и охлаждаемой после прокалки (код TL = 2), — модуль TFORMS; продолжительности заливки τ_z и температур расплава, заполнившего две части конусного участка пера, T_{z1} и T_{z2} — модуль TZALFPWN; критерия K_{gc} около выходной кромки пера — модуль KGWCPR.

Расчет $T_{фн}$ с помощью модуля TFORMS повторяется, если в качестве средства воздействия выбрана дополни-

тельная тепловая изоляция ($MS = 1$). В модуле *TZALFPWN* расчет продолжительности и температуры заливки расплава выполняется с учетом направления его потока, т. е. верхней или нижней заливки формы. В модуле *KGWCPR* использованы формулы (8)—(11). Если столбчатая структура устраняется, то расчет заканчивается. В противном случае корректируют выбор и параметры средств воздействия и расчет повторяется или прекращается и принимается решение о переходе на другой технологический процесс литья по выплавляемым моделям (ЛВМ).

По разработанной программе проведен анализ эффективности разных технологических средств воздействия. Так, для лопаток из сплава ЖС6У, имеющих толщину выходной кромки пера $y_k = 0,6$ мм и параметры конусной части пера $y/x = 0,4$, получаемых литьем в корундовую форму при $t_{зал} = 1500$ °С, понижение исходной температуры формы с 1200 до 800 °С уменьшает K_{gc} с $12,7 \cdot 10^6$ до $1,9 \cdot 10^6$ К · с/м². При этом возможен переход в область формирования однородной равноосной структуры. Аналогичное влияние оказывает температура заливки расплава, понижение которой до 1460 °С практически при любой начальной температуре формы в реальном диапазоне гарантирует отсутствие столбчатой структуры в пере. Соответственно при уменьшении конусности пера при $T_{ф} = 1100$ °С до 0,3 оказывается возможным повысить температуру заливки сплава с 1495 до 1550 °С, не нарушая при этом однородности структуры.

На практике целесообразно применять данные технологические средства воздействия на формирование однородной структуры. Их эффективность зависит от температурных режимов литья и параметров средств воздействия. Например, применение дополнительной тепловой изоляции на оболочке формы выходной кромки пера рационально при охлаждении формы после ее выгрузки из прокаточной печи до заливки. Наибольший эффект достигается, когда исходная температура формы участка // больше температуры формы участка I.

Эффективность использования "карандаша" для устранения неоднородной структуры около выходной кромки пера относительно низкая даже при малом расстоянии до выходной кромки. Поэтому его применяют, если производится подогрев формы перед заливкой и критерий K_{gc} незначительно превышает его критическое значение. Такой прием также подтверждается практикой, когда при переходе на технологию литья лопаток с тепловой изоляцией во всех случаях "карандаш" заменяли на дополнительную тепловую изоляцию.

Расчеты показывают, что самым действенным средством устранения неоднородной структуры является технологический напуск на выходной кромке пера. Так, технологический напуск 0,8 мм на выходной кромке толщиной 0,6 мм и конусностью 0,3 при температурах заливки

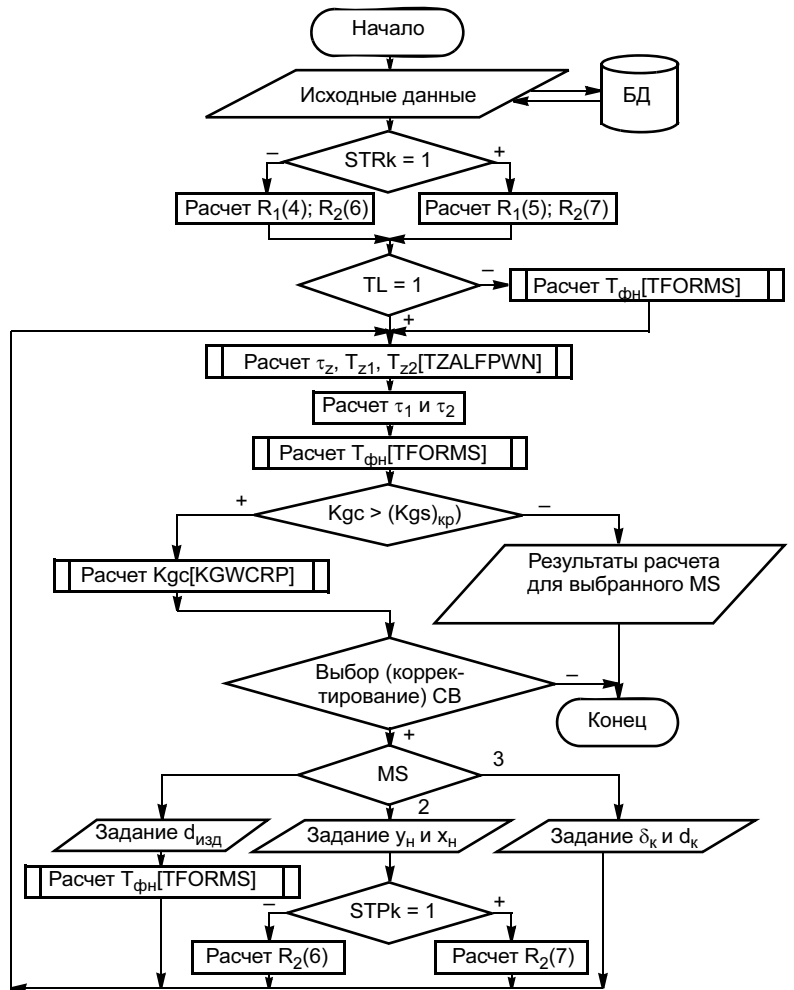


Рис. 3. Блок-схема программы расчета однородности структуры около выходной кромки пера и выбора требуемого средства воздействия (СВ) на формирование структуры

1550 °С и начальной формы 1100 °С устраняет столбчатость структуры, а напуск 3,8 мм приводит к тому же эффекту для конусности 0,5. Однако необходимо помнить о дополнительной механической обработке отливки.

Расчетные методики по проектированию перечисленных технологических средств воздействия реализованы в прикладной программе и опробованы в производстве при проектировании технологических процессов ЛВМ лопаток с равноосной структурой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Флемингс М. Процессы затвердевания: Пер. с англ. М.: Мир, 1977. 424 с.
2. Вайнгард У. Введение в физику кристаллизации металлов: Пер. с англ. М.: Мир, 1967.
3. Автоматизированное проектирование литниковых систем для рабочих лопаток газотурбинных двигателей / А. Ф. Смыков, А. А. Неуструев, А. А. Федосов и др. // Литейное производство. 2003. № 1. С. 30—32.
4. Проектирование литниково-питающих систем для ЛВМ турбинных лопаток / А. А. Неуструев, А. Ф. Смыков, В. И. Савин, А. Я. Денисов // Литейное производство. 2000. № 7. С. 43—45.

А. П. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, В. И. ГАЛКИН, д-р техн. наук, А. Р. ПАЛТИЕВИЧ, канд. техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Особенности применения конечно-элементного анализа процессов обработки металлов давлением и перспективы прогнозирования структуры и свойств изделий

Обработку металлов давлением (ОМД) широко применяют для изготовления изделий ответственного назначения. Для процессов ОМД характерна хорошая проработка структуры материала, однако в ряде случаев наблюдается значительная неоднородность этой проработки, что является причиной возникновения разнородной структуры и неравномерности распределения свойств изделия по объему. В этой связи для процессов пластической деформации важное значение имеет применение методов прогнозирования и управления характеристиками изделий. К числу наиболее существенных факторов, влияющих на свойства изделия, относится формируемое в процессе пластической деформации напряженно-деформированное состояние (НДС) материала. Одними из возможных способов анализа НДС являются методы математического моделирования. Исследование пластического течения металлических материалов относится к числу наиболее сложных задач математического анализа, для которых полная математическая модель содержит 15 в основном интегральных и дифференциальных уравнений. Точное решение подобных систем классическими методами не представляется возможным, в связи с чем до последнего времени применяли упрощенные методы анализа, не обладающие высокой точностью. Теоретическое исследование НДС заготовки носило скорее качественный, чем количественный характер. Кроме того, проследить в динамике картину пластического течения материала было невозможно. При разработке нового технологического процесса до сих пор, как правило, не принимается во внимание характер течения материала, а в качестве исходных данных при разработке

технологии используют чертеж чистой детали, а также информацию о марке и состоянии поставки материала. Вследствие этого вопросы управления структурой и свойствами деформируемых материалов, которые во многом определяются характером НДС, решают главным образом на уровне эмпирических знаний.

С появлением современных систем математического моделирования (CAE-систем) в руки специалистов попал инструмент, позволяющий получать высокоточные численные решения 3D-задач пластического течения как для гомогенных, так и гетерогенных металлических материалов. CAE-системы, реализованные, как правило, на базе метода конечных элементов (МКЭ), позволяют при разработке детально анализировать деформационный процесс и давать подробную информацию о характере распределения и изменения НДС на любой стадии и в любой зоне очага деформации. Дополнительным преимуществом CAE-систем является функция анимации моделируемого процесса, позволяющая в динамике изучать характер пластического течения, что часто облегчает понимание причин возникновения дефектов. Однако при исследовании процессов горячей пластической деформации для реального управления структурой и свойствами материала изделия требуется информация не только о характере распределения НДС, но и о его взаимосвязи с последующим режимом термической обработки, начальной структурой заготовки и другими параметрами, т. е. требуется учет взаимосвязи параметров НДС технологического процесса с физическими явлениями, сопровождающими пластическую деформацию, и последующими структурными и фазовыми превращениями в материале.

Сложилась парадоксальная ситуация, заключающаяся в появлении новых программно-аппаратных средств высокоэффективного анализа деформационных процессов ОМД, позволяющих получать большой объем новой информации об изучаемом процессе. Однако эта информация для управления структурой и свойствами материала изделия эффективно не используется. Основная причина этого связана с особенностями методики конечно-элементного анализа. МКЭ изучает механику процесса пластической деформации. На этапе дискретизации заготовку разбивают на конечные элементы, которые никак не связаны с металлографической структурой материала. В результате решения в узловых точках конечно-элементной сетки определяют действительные значения скоростей их перемещения. Эти данные позволяют определять в объеме каждого конечного элемента значения компонент тензоров деформации и скорости деформации. Для расчета компонент тензора напряжений дополнительно требуются данные о среднем напряжении и реологических свойствах деформируемого материала. В CAE-системах они задаются в виде функции-полинома сопротивления деформации в зависимости от степени деформации и температурно-скоростных условий процесса. Так осуществляется связь механики процесса с физическими и механическими характеристиками материала. Подобный подход, основанный на усреднении характеристик фазового состава структуры материала, вполне оправдан при изучении НДС процесса, так как значительно упрощает постановку расчетной задачи и уменьшает требуемое число конечных элементов, необходимое для достижения корректного решения. Негатив-

ная сторона данного подхода связана с полным игнорированием влияния металлографической структуры материала, что затрудняет прогноз фазового состава изделия после его пластической обработки.

Более перспективный, но и более сложный подход связан с наложением конечно-элементной сетки на металлографическую структуру материала. В этом случае имеется несколько проблем. Первая из них связана с мощностью персональных компьютеров, доступных рядовым технологам. На сегодняшний день за приемлемый промежуток времени можно решить задачу пластического течения при разбиении области дискретизации на 50—60 тысяч конечных элементов. Эта цифра приближительная, при этом такого разбиения явно недостаточно для анализа деформационного процесса габаритных заготовок из материала с мелкой и тем более ультрамелкой структурой. Учитывая темпы развития программно-аппаратного обеспечения в последние десятилетия, можно предположить, что через 5—10 лет мощность персонального компьютера вполне позволит решать подобные задачи, т. е. данная проблема является чисто технической.

Вторая проблема более серьезная, она связана непосредственно с постановкой задачи. В настоящее время, как отмечалось, при конечно-элементном анализе материал заготовки рассматривают как поликристаллическое тело, т. е. его реологические свойства усредняют для всей области дискретизации (если речь идет не о слоистых либо других гетерогенных материалах). В новой постановке задачи реологические свойства нужно задавать не для конкретной марки материала, а для каждой входящей в его состав фазы с учетом ее анизотропии свойств в зависимости от металлографического направления. Даже принимая во внимание, что при горячей пластической деформации температурный интервал обработки выбирают таким образом, чтобы материал имел однофазную структуру, тем не менее не существует методик определения реологических свойств для отдельных фаз. Однако и этого оказывается недостаточно. Подобная математическая мо-

дель должна также учитывать процесс рекристаллизации, который сопровождает горячую пластическую деформацию, а для этого необходимо знать количественные закономерности преобразования металлографической структуры материала в зависимости от НДС и температурно-скоростных условий процесса. Учитывая сказанное, данный подход, безусловно, весьма интересен, однако на сегодняшний день не осуществим. Для его реализации потребуются создание новых методологий и методик, проведение комплексных исследований на базе современного программно-аппаратного и экспериментального оборудования.

Более реальным направлением, позволяющим на базе результатов МКЭ процессов горячей ОМД прогнозировать структуру и свойства получаемых изделий, являются расчеты, основанные на количественных закономерностях изменения структуры материала при охлаждении изделия после горячей пластической деформации либо в процессе его термической обработки в зависимости от НДС. В настоящее время уже существуют САЕ-системы, имеющие программные модули, позволяющие проводить подобный анализ. В качестве исходных данных в этом случае требуются результаты расчета напряженно-деформированного состояния и температурно-скоростные условия последующих после ОМД термических процессов. Хотя в этом случае не учитывается начальное состояние структуры обрабатываемого материала, тем не менее расчеты позволяют оценить его фазовый состав в готовом изделии. Существенная сложность при реализации данного подхода связана с необходимостью получения для исследуемого металлического материала функциональных зависимостей, отражающих влияние параметров процесса термической обработки и НДС на его структуру и свойства. Для получения подобных зависимостей требуется проведение большого объема экспериментальных работ, поэтому не случайно, что анализ изменения структуры в настоящее время реален только для отдельных групп материалов, для которых подобные исследования уже проведены. Хотя рассматриваемая

методика также оперирует усредненными характеристиками используемого материала и не учитывает состояния его начальной структуры, нет сомнений, что в ближайшее время данное направление получит широкое развитие.

Другое направление исследований, позволяющее по результатам МКЭ прогнозировать характеристики материала, основано на использовании знаний механизмов прохождения пластической деформации. В качестве иллюстрации данного подхода можно рассмотреть процесс получения объемной штамповкой фланцев из алюминиевого сплава АМгб. Чистовая деталь представляет собой полую изделие осесимметричной формы со сложной образующей. В мелкосерийном производстве подобные детали получают по схеме выдавливания с предварительной осадкой заготовки на минимальный размер ручья штампа (рис. 1). Процесс протекает при 460—480 °С. При интенсивном пластическом течении наблюдается неравномерный разогрев заготовки, что приводит в зонах максимальных температур к включению механизма межзеренной деформации. За счет этого формируется зона интенсивной пластической деформации, которая на шлифе зафиксирована в виде темной полосы, проходя-

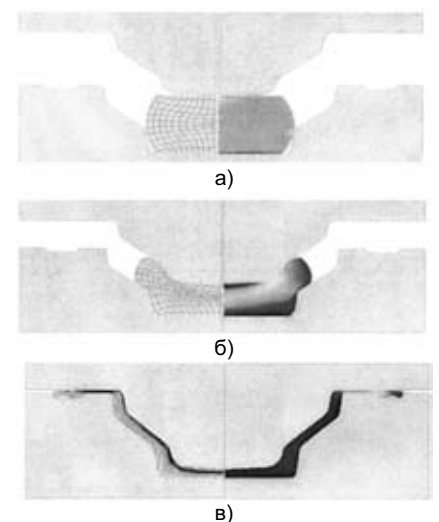


Рис. 1. Этапы моделирования получения детали по схеме выдавливания: а—в — начальная, промежуточная и заключительная стадии выдавливания соответственно

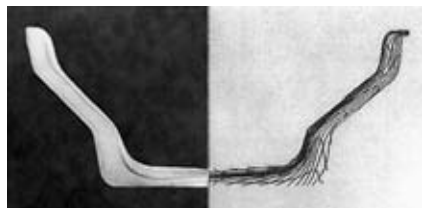


Рис. 2. Металлография (слева) и лагранжева сетка (справа)

щей вдоль образующей. Сравнение результатов конечно-элементного анализа с металлографическими данными показывает, что появление этой зоны легко прогнозируется по сгущению линий лагранжевой сетки (рис. 2). Появление подобных зон является нежелательным явлением. Для его устранения требуется снижение температуры разогрева заготовки в процессе пластического течения, что позволит провести формоизменение заготовки по механизму внутризеренной деформации и исключить межзеренное течение. Это возможно благодаря применению штамповки по схеме вытяжки (рис. 3). Для этого заготовку предварительно осаживают на максимальный размер ручья штампа, за счет чего последующее пластическое течение протекает не столь интенсивно, как в первом случае. Для гарантированного исключения возможности деформации заготовки по механизму межзеренного течения начальную температуру штамповки следует снизить до минимальной для данного материала. Правильность

сделанных выводов хорошо подтверждается сравнением лагранжевых сеток, полученных при расчете по рассмотренным схемам процесса штамповки (рис. 4), и результатами

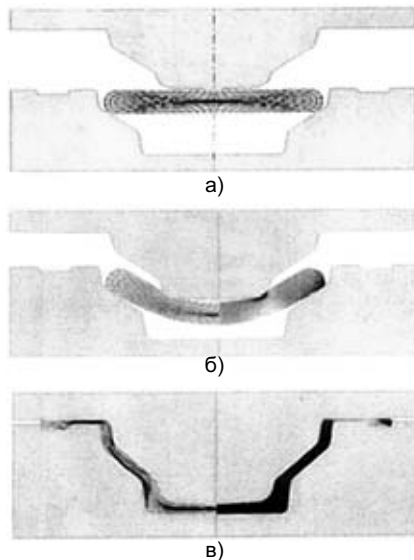


Рис. 3. Этапы моделирования получения детали по схеме вытяжки: а—в — начальная, промежуточная и заключительная стадии вытяжки соответственно



Рис. 4. Сравнение результатов моделирования получения изделия по схемам выдавливания и вытяжки

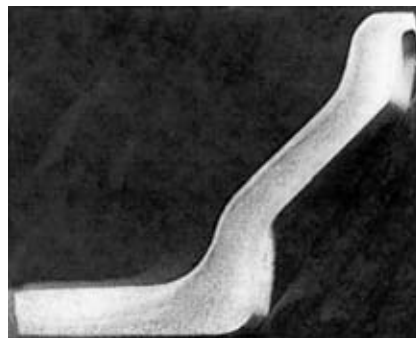


Рис. 5. Металлографическое исследование детали, полученной по схеме вытяжки при степени предварительной деформации 32 %, $T = 320\text{ }^{\circ}\text{C}$

металлографических исследований (рис. 5).

Таким образом, перспективы прогнозирования структуры и свойств изделий, полученных горячей ОМД, связаны с объединением механического подхода, заложенного в МКЭ, с физико-химическими основами пластической деформации. Если методика конечно-элементного анализа разработана хорошо и на ее основе создан целый ряд профессиональных САЕ-систем, то уровень формализации физических процессов, сопровождающих горячую пластическую деформацию, пока еще не позволяет получать их количественные зависимости. Это огромное поле деятельности для специалистов в области пластической деформации, которое требует разработки новых методических подходов, методов исследования и оборудования.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ!

Напоминаем Вам, что оформить подписку на журнал можно с любого месяца

в любом почтовом отделении связи.

Подписной индекс в каталоге Агентства "Роспечать" — 79494,

в Объединенном каталоге "Пресса России" — 27869,

в каталоге "Почта России" — 60190.

Ю. О. БАХВАЛОВ, канд. техн. наук
ГКНПЦ им. М. В. Хруничева

Методология интегрирования композиционных корпусных элементов в конструкцию ракет

Развитие и модернизация современной ракетной и космической техники сопровождаются активным внедрением композиционных материалов (КМ), что существенно повышает весовую эффективность силовых конструкций за счет высоких удельных характеристик прочности, жесткости КМ, возможности направленного формирования заданных механических свойств [1, 2].

Наиболее сложной и важной с научной и практической точек зрения является проблема интегрирования новых элементов в конструкцию модернизируемого ракето-носителя (РН). В соответствии с этим процесс проектирования несущих конструкций РН предусматривает решение ряда взаимосвязанных научно-технических задач, в том числе:

- анализ исходной конструкции РН и выбор материалов с целью определения стратегических направлений и условий модернизации;

- математическое моделирование силового взаимодействия, включающего разработку инженерно-аналитических методов оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) крупногабаритных составных частей (СЧ) РН, целью которого является предварительный расчет элементов;

- создание тестовых и контролируемых условий для последующего масштабного численного динамического расчета как самих исследуемых элементов, так и элементов в составе смежных отсеков в широком диапазоне расчетных случаев (транспортировка, старт, разделение ступеней, полет, вывод на орбиту и др.), целью которого является определение запасов прочности, проверка работоспособности аналитических решений, назначение режимов и контролируемых параметров испытаний;

- экспериментальная отработка, предусматривающая весь комплекс натурных статических, вибрационных, ударных и других испытаний модернизируемых элементов (рис. 1).

При анализе исходной конструкции РН рассматривают множество вариантов снижения "сухой" массы изделия и определяют элементы, которые могут быть выполнены из более легких материалов.

Основными принципами выбора элементов являются:

- сохранение без изменения наиболее важных, требующих длительных циклов отработки систем и узлов;

- основное внимание уделяется модернизации третьей ступени, так как ее масса входит в конечную массу при выведении космической головной части на опорную орбиту;

— выбор типа конструкции элемента из полимерных композитов и технологии изготовления определяется особенностями смежных отсеков и общей силовой схемой изделия; в ряде ситуаций определяющей является конструкция мест сопряжения металлических и композитных элементов конструкции.

Применительно к объекту исследования данной работы — РН "Протон" — такими элементами являются адаптер переходной системы, приборный и хвостовой отсеки второй ступени, головной обтекатель, хвостовой отсек третьей ступени, трубопроводы топливной системы и др.

Большое значение для достижения поставленной цели имеет обоснованный выбор материала модернизируемого элемента конструкции РН, который базируется на анализе свойств композиционных материалов и методов соединения композитных элементов [3].

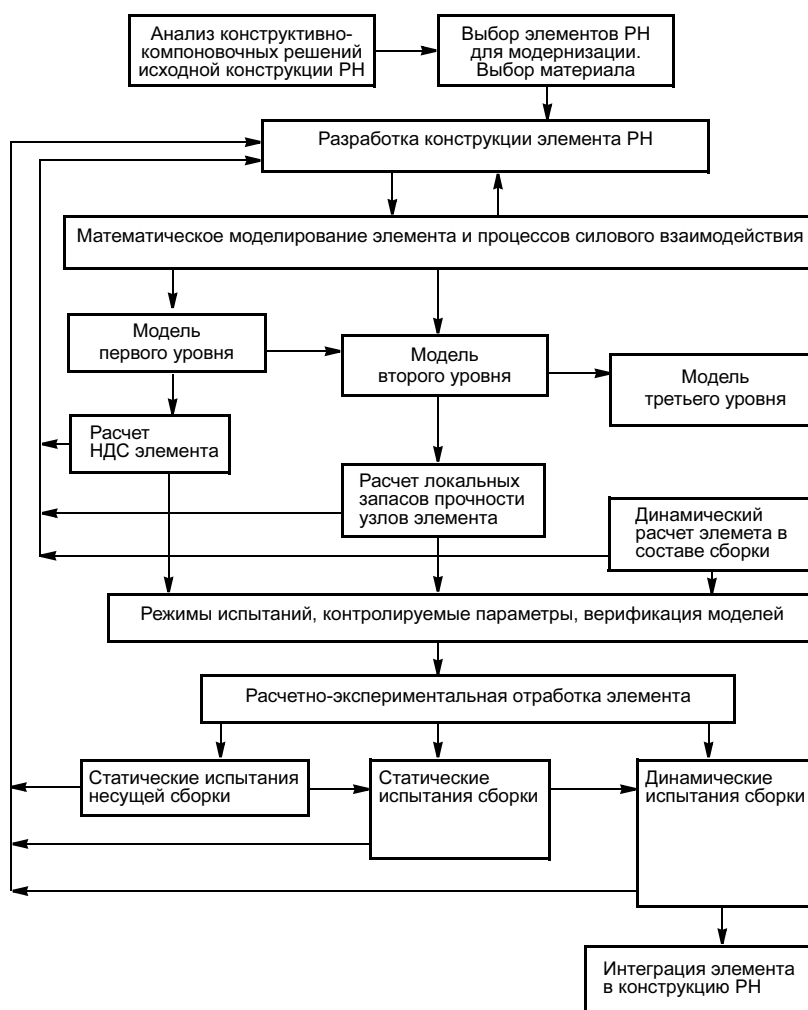


Рис. 1. Концептуально-ориентированный алгоритм модернизации конструкций

Полимерные композиционные материалы (ПКМ) включают три вида КМ с различными полимерными матрицами: углепластики, органопластики и стеклопластики. В целом по комплексу свойств для корпусных и силовых конструкций пригодны только углепластики. Технология изготовления углепластиков позволяет реализовать любые схемы армирования и в свою очередь — оптимальные сочетания свойств материалов [4].

Важным вопросом является появление остаточных деформаций в материале. Результаты обработки результатов экспериментов по ползучести показывают, что до пределов $0,8\sigma_B$ (предела прочности) углепластики не подвержены ползучести. Ползучесть углепластиков зависит от количества дефектов в материале и может быть резко уменьшена технологическими приемами, например, снижением температуры отверждения, что снижает наличие микротрещин.

Для применения в качестве СЧ РН материалы должны обладать такими свойствами, как демпфирование колебаний, высокая усталостная прочность, высокий динамический модуль упругости. Результаты экспериментов показывают, что до частоты 1200 Гц для однонаправленного углепластика динамический модуль упругости остается постоянным и превышает статический на 27 %. Для углепластиков декремент затухания может достигать 10—15 %.

Углепластики обладают высокой вибропрочностью. При низком уровне напряжений усталостная долговечность углепластика стремится к бесконечности.

Для более полной реализации потенциально высоких механических характеристик современных композитных материалов необходимы конструктивные решения, позволяющие получать интегральные конструкции с несущими

Характеристика ¹	Соединение		
	Клепаное	Сварное	Клеевое
Прогиб, мм	2,24	1,83	1,98
Прочность после 10^6 циклов, МПа	0,45	0,55	1,00

¹При испытании двутавровой балки различной конструкции.

щими элементами из однонаправленного, т. е. армированного в одном направлении, композита. К таким решениям можно отнести конструкцию типа "изогрид". Она состоит из системы ребер одинаковой толщины, образующих равносторонние треугольники.

Характерной особенностью такой конструкции является то, что она квазиизотропна в плоскости сетки, т. е. модули упругости во всех направлениях одинаковы, и именно это свойство конструкции послужило основной причиной выбора параметров ячейки — оно позволяет применять для расчета и проектирования соотношения теории изотропных пластин и оболочек.

Конструкция мест соединений во многом зависит от материалов сопрягаемых деталей, поэтому влияние мест соединения необходимо учитывать при весовом анализе и выборе конструкционных материалов.

Анализ результатов исследования фланцевых и нахлесточных, сварных, паяных, клеевых, клееболтовых и клеезаклепочных соединений элементов конструкций из КМ показал, что для соединения КМ наиболее предпочтительными являются клееболтовые соединения [5].

Введение клеевого шва в механические соединения снижает деформации ползучести на 30—40 %, увеличивает длительную прочность соединения. Усталостная прочность клеевых соединений выше, чем сварных (см. таблицу).

Анализ исходной конструкции РН проводился с учетом возможности модернизации путем замены отдельных конструктивных элементов на элементы, выполненные из более легких материалов, с целью повышения весовой эффективности РН.

Ускоритель первой ступени РН (рис. 2) состоит из центрального блока (блока О) и шести боковых блоков (блоков Г), симметрично расположенных вокруг блока О и закрепленных на нем с помощью системы подвески. Центральный блок или блок О включает хвостовой отсек, бак О, проставку и ферму, которые воспринимают нагрузки, действующие на РН.

Хвостовой отсек является силовым элементом корпуса ускорителя и одновременно

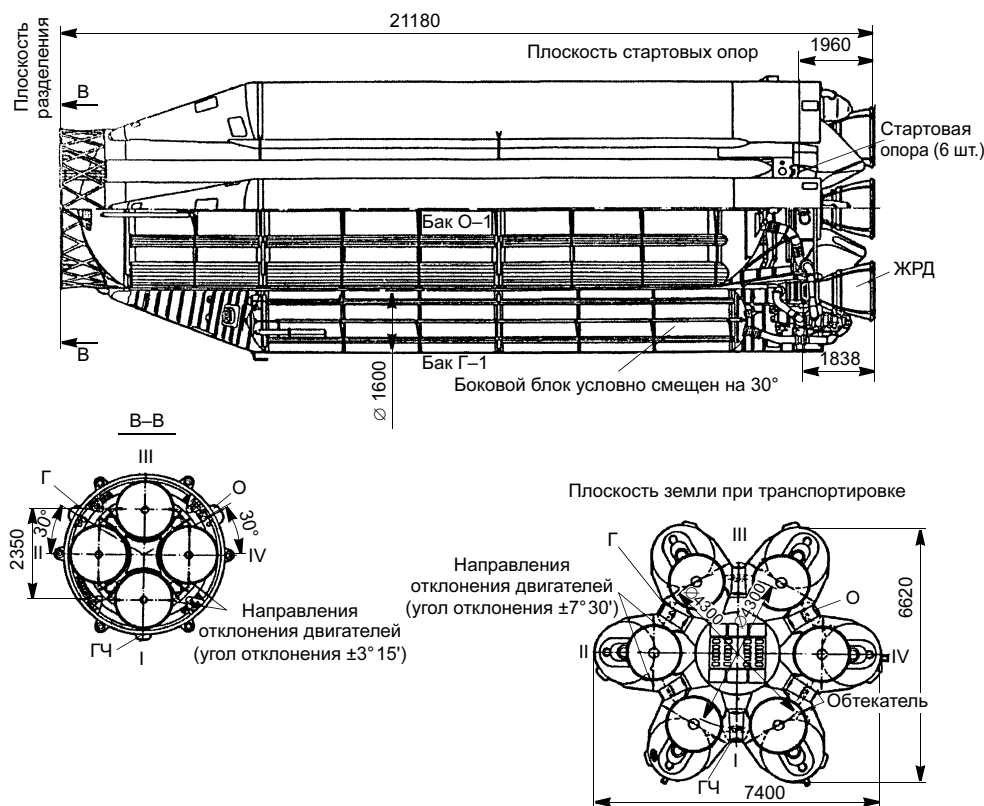


Рис. 2. Компонка ускорителя первой ступени

менно служит для крепления коммуникаций пневмо-гидро-систем (ПГС). Отсек состоит из обечайки, экрана блока О и фермы для крепления трубопроводов. Обечайка — клепаной конструкции, выполнена в виде усеченного конуса, состоящего из обшивки, поперечного и продольного силовых наборов.

Ферма крепления трубопроводов служит для крепления магистралей подвода окислителя и горючего к двигателям. Она представляет кольцо из стальной трубы, закрепленное болтами с помощью шести парных подкосов на шпангоуте. Бак О состоит из корпуса, нижнего и верхнего днищ. Все элементы бака выполнены из алюминиевого сплава.

Проставка включает обшивку, два шпангоута и двадцать кронштейнов. Все элементы проставки выполнены из алюминиевого сплава, обшивка — из листового материала. Шпангоуты — стыковые. Для соединения штепсельных разъемов (ШР), монтажа и обслуживания агрегатов, размещенных в отсеке, предусмотрены семь эксплуатационных люков, закрываемых крышками на болтах.

Бак Г — цилиндрической формы, включает обечайку, верхнее и нижнее днища. Все элементы выполнены из свариваемого алюминиевого сплава. Передний отсек является аэродинамическим обтекателем блока Г и одновременно используется для размещения приборов СУ и датчиков ПГС. Конструктивно отсек выполнен в виде конуса. Верхняя часть его — обтекатель — съемная для доступа к коммуникациям и приборам. Нижняя часть состоит из обшивки и пятнадцати шпангоутов (двенадцать промежуточных, стыковой, наклонный и силовой). Обшивка выполнена из пяти алюминиевых листов. Аналогичные конструкции имеют ускорители второй и третьей ступеней.

РН имеет две плоскости разделения в полете по стыкам ускорителя первой ступени с ускорителем второй ступени и ускорителя второй ступени с ускорителем третьей ступени.

При анализе вариантов снижения массы РН необходимо учитывать принцип сохранения наиболее важных, требующих длительных циклов отработки систем и узлов. Наибольшее внимание необходимо уделить модернизации третьей ступени, так как ее масса входит в конечную массу при выведении космической головной части на опорную орбиту.

Однако мероприятиям по облегчению может быть подвергнута вторая и даже первая ступени. При этом наиболее эффективным является применение различных технологий внедрения полимерных КМ в каркасы: мотанные отсеки сетчатой конструкции и герметичные корпуса с металлическим лайнером, клееные трехслой-

ные конструкции с металлическими сотами, прессованные панельные отсеки или комбинированные конструкции.

Выбор типа конструкции из полимерных композитов и технологии изготовления определяются особенностями смежных отсеков, общей силовой схемой изделия, конструкцией мест сопряжения металлических и композитных конструкций.

Выполненный анализ конструкции РН позволил установить целесообразность конструктивных изменений для головного обтекателя, адаптера разгонного блока (рис. 3), приборного и хвостового отсеков второй ступени, хвостового отсека третьей ступени, элементов крепления двигательных установок, трубопроводов топливной системы. Интегрирование перечисленных элементов в исходную конструкцию не влияет на конструкцию основных узлов РН, что позволяет выполнить независимую доводку разрабатываемых элементов и их поэтапное внедрение.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный концептуально-ориентированный алгоритм модернизации конструкций ракето-носителя космического назначения позволяет осуществлять направленное интегрирование новых элементов с целью повышения весовой эффективности ракето-носителя при сохранении наиболее важных, требующих длительных циклов отработки систем и узлов.

2. Наиболее важной является модернизация третьей ступени, так как ее масса входит в конечную массу при выведении космической головной части на опорную орбиту. При этом мероприятиям по облегчению может быть подвергнута вторая и даже первая ступени.

3. Наиболее эффективным является применение различных технологий внедрения полимерных композиционных материалов в каркасы.

4. Выбор типа конструкции из полимерных композитов и технологии изготовления определяются особенностями смежных отсеков, общей силовой схемой изделия, конструкцией мест сопряжения металлических и композитных конструкций.

Установлена целесообразность конструктивных изменений для головного обтекателя, адаптера разгонного блока, приборного и хвостового отсека второй ступени, хвостового отсека третьей ступени, элементов крепления двигательных установок, трубопроводов топливной системы.

5. Интегрирование перечисленных элементов в исходную конструкцию не влияет на конструкцию основных узлов ракето-носителя, что позволяет выполнить независимую доводку разрабатываемых элементов и их поэтапное внедрение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Голубев И. С., Самарин А. В. Конструкция и проектирование летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
2. Лизин В. Т., Пяткин В. А. Проектирование тонкостенных конструкций. М.: Машиностроение, 2003. 448 с.
3. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
4. Бахвалов Ю. О., Кулага Е. С., Громов С. Н. Исследование конструкции клеемеханической законцовки стержня из углепластика // РК-техника. М.: НПО "Композит", 1990.
5. Бахвалов Ю. О., Кулага Е. С. Исследование деформативности клеемеханических нахлесточных соединений элементов из углепластиков // РК-техника. М.: НПО "Композит", 1990.

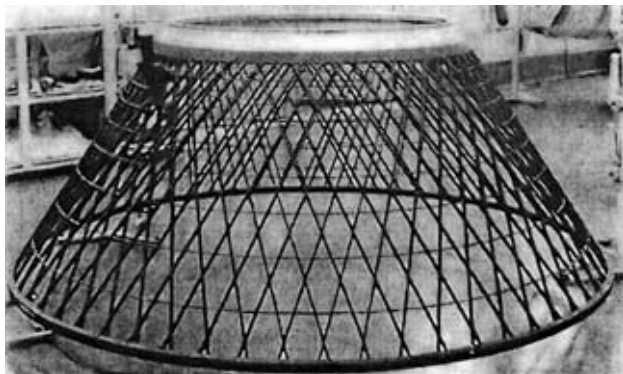


Рис. 3. Сетчатый углепластиковый адаптер

О. С. САМСОНОВ, канд. техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Моделирование процессов конструкторско-технологического проектирования сборки летательных аппаратов

Научно-методический базис конструкторско-технологического проектирования

Информационная поддержка процессов жизненного цикла изделия в соответствии с концепцией CALS должна осуществляться на основе интегрированной информационной модели изделия, объединяющей комплексы моделей, используемых для решения задач и представления данных на различных этапах реализации проекта. Ведущие авиационные КБ и заводы накопили большой опыт решения задач геометрического моделирования конструкций и создания электронных моделей изделия. Процессы создания и сопровождения электронных моделей летательных аппаратов (ЛА) регламентируются инструкциями (положениями) и стандартами предприятий. Отсутствие государственных стандартов по работе с электронными моделями и несоответствие методик электронного проектирования требованиям ЕСКД сдерживали внедрение современных информационных технологий. Ввод в действие новых стандартов ЕСКД (ГОСТ 2.052—2006, 2.053—2006) и корректировка действующих стандартов под представление технической информации в электронном виде обусловили создание необходимой нормативной базы для применения электронных моделей в качестве основных информационных объектов электронной конструкторской документации. В новых стандартах ЕСКД модельный подход четко регламентирован, т. е. электронная модель изделия определяется как первичный электронный документ, а чертежи — вторичные документы, получаемые на основе электронной модели.

При решении задач технологического проектирования в среде цифровых технологий также должен использоваться модельный подход, т. е. модель технологического процесса, спроектированная в автоматизированной системе, должна стать основным электронным документом, а комплект технологической документации (маршрутные и операционные карты, ведомости, эскизы и т. д.) формироваться в системе на основании модели технологического процесса. Однако в терминологическом словаре по CALS-технологиям и новых стандартах ЕСКД модельный подход к решению задач технологического проектирования не декларируется. Методы автоматизированного проектирования технологических процессов на основе математического моделирования изделий и производственно-технологической среды появились и активно разрабатывались в 70—80-е годы прошлого века. В ряде публикаций последних лет методики моделирования технологических систем и процессов адаптированы с учетом перехода на цифровые технологии проектирования и производства и требований концепции CALS. Однако ряд положений и терминов необходимо уточнить и регламентировать государственными стандартами, т. е. выполнить работу по корректировке комплекса

стандартов ЕСТПП в соответствии с требованиями CALS-технологий. Для этого прежде всего необходимо использовать отечественный научно-методический базис автоматизированного проектирования. Следует выделить ряд работ, оказавших большое влияние на методологию автоматизации технологического проектирования.

Система математического моделирования объектов машиностроения "ИСТРА" ("Иерархическая система трансляции") широко описана в учебной и научной литературе [1], а ее применение регламентировано руководящими документами, государственными стандартами и методическими материалами (РД 50-464—84, ГОСТ 23501.605—83). В системе "ИСТРА" описание объектов и процессов различной физической природы осуществляется с использованием регламентированных методов и уровней моделирования. Понятие контура F как совокупности свойств объекта используется для построения логических моделей регламентированных классов (конъюнктивные и дизъюнктивные модели). Вводится понятие технологического оператора τ как элемента технологического процесса T , воздействие которого на изделие A преобразует его структуру, свойства и параметры. Регламентируется применение типовых математических моделей и унифицированных алгоритмов их обработки для формализованного описания широкого спектра задач конструкторско-технологического проектирования.

В работах [2, 3] приведены методика моделирования, проектирования и оптимизации технологических процессов сборки, а также связи между конструкцией, технологией и организацией сборочного производства. Разработанные алгоритмы формирования и корректировки цикловых графиков сборки ЛА и их использование в виде динамических документов оперативного управления сборкой представляют большой интерес не только при серийном выпуске авиационной техники, но и когда при мелкосерийном и единичном производстве необходимо для каждой машины формировать индивидуальный график сборки с учетом ее формы и ресурсных ограничений.

Комплекс работ, выполненных в Институте технической кибернетики АН БССР, по теории технологического проектирования, методология системно-структурного анализа и метод многоуровневого итерационного проектирования технологических процессов [4], комплексная автоматизированная система подготовки производства КАС ТПП "Технолог", работы в области автоматизированного проектирования станочных приспособлений, а также ряд других разработок не потеряли своей актуальности и в настоящее время.

Работы по созданию отраслевой технологической информационной базы (ОТИБ), выполненные отраслевым технологическим институтом авиационной промышленности совместно с рядом предприятий, основываются на методике структуризации и типизации элементов технологического процесса и реализации модульного принципа формирования информационного обеспечения [5].

Для этого введены понятия базового технологического модуля (БТМ) и комплексного технологического модуля (КТМ). На ряде предприятий отрасли созданы информационные системы на основе применения методологии БТМ—КТМ, показавшие хорошую функциональность и экономическую эффективность. К ним прежде всего следует отнести Ульяновский авиационный промышленный комплекс "УАПК", ныне ЗАО "Авиастар-СП".

Методология проектирования, основанная на применении электронного макета изделия и модели технологической среды для автоматизированного формирования модели технологического процесса, реализована в автоматизированной системе технологического проектирования "ТеМП". Принципы ее создания, функциональные возможности и опыт использования приведены в работах [6—8].

В данной работе рассмотрены подходы к формированию системы моделей, реализующей проектирование технологических процессов на принципах CALS-технологий. При создании системы "ТеМП" использовали ряд положений и научно-методических решений [1—4], при этом методология технологического проектирования была доработана с учетом требований формирования и управления компонентами интегрированной электронной модели изделия на различных этапах жизненного цикла изделия.

Интегрированная информационно-программная среда конструкторско-технологического проектирования

Для формирования комплекса математических моделей, описывающих процессы проектирования изделий и подготовки производства, приняли в качестве базовых:

— терминологию, условные обозначения и основные положения системы "ИСТРА" по методологии формирования теоретико-множественных логических и количественных моделей, соответствующих разному уровню знаний и полноте представления данных о разнородных объектах;

— методологию системно-структурного анализа, в соответствии с которой модель технологического процесса представляется в виде иерархической структуры, каждый элемент которой описывается совокупностью функциональных и структурных свойств и отношений. Нижний уровень соответствует описанию элементарных объектов, структура которых не раскрывается;

— методологию объектно-ориентированного моделирования, позволяющую описывать модели технологических процессов в виде множества объектов различных классов, их связей и характеристик;

— методы геометрического моделирования, предназначенные для формирования геометрических моделей объектов, взаимодействующих в технологическом процессе, и управления их геометрией в ходе технологического проектирования.

Базовая формула параллельного проектирования [9]

$$S(A)_p S(P) \rightarrow S(T), \quad (1)$$

где $S(A)$, $S(P)$, $S(T)$ — модели исходного объекта (изделия), порождающей среды (технологического проектирования) и объекта проектирования (технологического процесса) соответственно; p — процедурно-алгоритмическая среда, описывающая взаимодействие моделей в ходе проектирования.

Формула (1) является универсальной, которую можно применять для описания последовательных, параллельных и итерационных процессов, реализуемых при проектировании, конструировании и подготовке производства.

Детализируем формулу (1) с учетом ряда дополнений.

1. Выделим следующие классы моделируемых объектов:

$$O = \{A, P, T, \Pi\},$$

где A , P , T , Π — модели изделия, элементов производственной среды, технологических процессов и процессов проектирования соответственно.

2. Выделим в структуре процесса проектирования два класса моделей:

— $S^{\Pi}(O)_i$ — порождающая модель объекта класса O_i , предназначенная для формирования проектных решений и описывающая структурные логические и количественные связи между элементами объекта, а также алгоритмы структурного, геометрического и параметрического синтеза;

— $S^P(O)_i$ — результирующая модель объекта, представляющая конкретное решение и являющаяся i -м экземпляром порождающей модели объекта класса O_i при фиксированных значениях структуры, свойств и параметров.

3. Выделим два класса моделей изделия:

— $S(A^K)$ — конструкторская модель изделия, описывающая структуру, свойства и геометрию изделия и его конструктивных элементов;

— $S(A^T)$ — технологическая модель изделия, описывающая состояние изделия на определенном этапе его изготовления.

В соответствии со схемой взаимодействия моделей параллельного проектирования (рис. 1) в структуре интегрированной информационно-программной среды выделены среда формирования конструкторских $S(A^K)$ и технологических $S(A^T)$ моделей изделий; среда проектирования технологических процессов $S(T^A)$ и среда формирования моделей средств технологического оснащения $S(P^T)$.

В свою очередь в каждой среде выделен ряд уровней.

Модели первого уровня включают:

— в среде $S(A^K)$ — параметрические модели типовых конструктивных элементов деталей и сборочных единиц;

— в среде $S(A^T)$ — параметрические модели типовых конструктивно-технологических элементов деталей и сборочных единиц (базовые отверстия, припуски и т. д.);

— в среде $S(T^A)$ — параметрические модели типовых операций и переходов (базовые и комплексные технологические модули);

— в среде $S(P^T)$ — параметрические модели типовых конструктивных элементов средств технологического оснащения.

Горизонтальные стрелки между моделями первого уровня (см. рис. 1) отражают связи (в общем случае многовариантные) между элементами разных сред. Этот уровень является библиотекой интегрированных конструктивно-технологических решений (КТР), поскольку описывает для типовых конструктивно-технологических элементов деталей и сборочных единиц возможные варианты их технологической реализации.

Модели второго уровня включают:

— в среде $S(A^K)$ — порождающие конструкторские модели деталей и сборочных единиц различных классов,

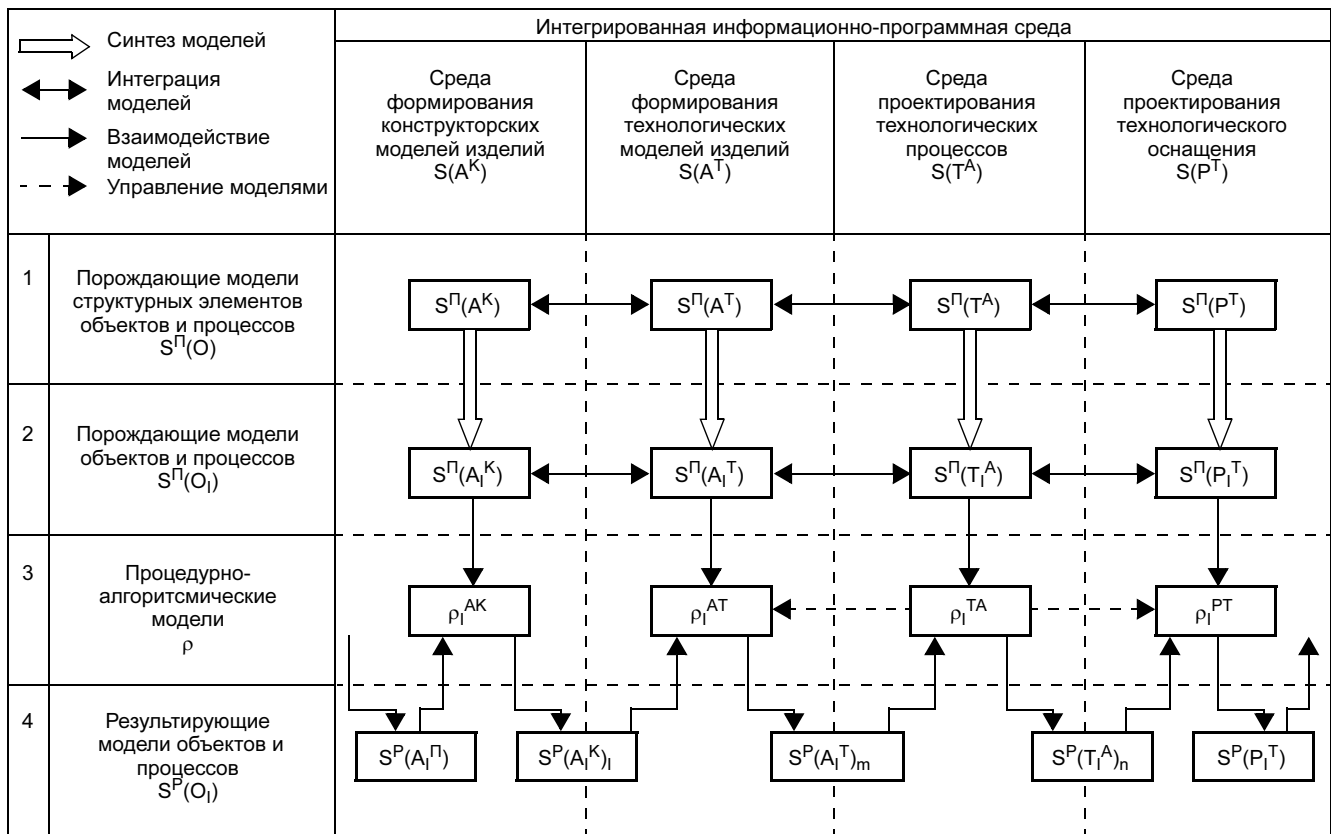


Рис. 1. Схема взаимодействия моделей параллельного проектирования

сформированные с использованием библиотеки конструкторских элементов первого уровня;

— в среде $S(A^T)$ — порождающие технологические модели деталей и сборочных единиц, созданные из библиотечных элементов первого уровня;

— в среде $S(T^A)$ — порождающие модели технологических процессов, сформированные с использованием моделей типовых технологических операций и переходов;

— в среде $S(P^T)$ — порождающие модели средств технологического оснащения, синтезированные с использованием параметрических моделей типовых конструктивных элементов средств технологического оснащения (СТО).

Данный уровень является библиотекой интегрированных КТР для типовых деталей и сборочных единиц различных классов. При использовании библиотеки первого уровня для формирования библиотеки КТР второго уровня число связей (вариантов) уменьшается с учетом ограничений, накладываемых на возможность использования КТР первого уровня конструктивно-технологическими особенностями изделия.

Модели третьего уровня включают процедуры и алгоритмы, используемые в различных средах для синтеза порождающих моделей второго уровня на этапе их формирования, а также при интерпретации (обработке) порождающих моделей в процессе проектирования при формировании результирующих моделей объектов и процессов:

— в среде $S(A^K)$ — процедуры формирования конструкторских моделей изделий из параметрических моделей деталей с использованием механизмов параметризации и ассоциативности;

— в среде $S(A^T)$ — процедуры формирования технологической модели изделия и управления ее состоянием

при проектировании и моделировании технологического процесса;

— в среде $S(T^A)$ — процедуры синтеза порождающей модели технологического процесса $S^П(T_I^A)$ из моделей проектирования видов работ (выбор вида работ и привязка его к компонентам модели изделия), проектирование операций и переходов на основе автоматизированной обработки алгоритмов технологического проектирования, формирование и передача в среду $S(A^T)$ информации, необходимой для изменения состояния модели изделия после выполнения вида работ;

— в среде $S(P^T)$ — процедуры формирования моделей СТО, проектирование геометрии рабочих поверхностей оснастки, выбор конструктивной схемы, компоновка приспособления, моделирование перемещений рабочих элементов приспособлений в ходе выполнения работ.

Модели четвертого уровня включают результирующие модели изделия (конструкторские и технологические), технологического процесса и СТО:

— в среде $S(A^K)$ — электронные конструкторские макеты изделия;

— в среде $S(A^T)$ — технологические электронные макеты изделия;

— в среде $S(T^A)$ — модели технологических процессов;

— в среде $S(P^T)$ — технологические электронные макеты СТО.

В соответствии с вышеизложенным формула (1) в различных средах параллельного проектирования интерпретируется следующим образом:

— формирование конструкторской модели изделия

$$S^P(A_I^П) \rho_I^{AK} S^П(A_I^K) \rightarrow S^P(A_I^K); \quad (2)$$

— формирование технологической модели изделия

$$S^P(A_1^K) \rho_1^{AT} S^\Pi(A_1^T) \rightarrow S^P(A_1^T); \quad (3)$$

— формирование модели технологического процесса

$$S^P(A_1^T) \rho_1^{TA} S^\Pi(T_1^A) \rightarrow S^P(T_1^A); \quad (4)$$

— формирование модели технологического оснащения

$$S^P(T_1^A) \rho_1^{PT} S^\Pi(P_1^T) \rightarrow S^P(P_1^T). \quad (5)$$

Рассмотрим особенности реализации данных процессов с учетом того, что основное внимание в данной работе уделяется моделям технологического проектирования, а конструкторские модели рассматриваются с точки зрения подготовки исходной информации для проектирования технологических процессов.

Конструкторские модели изделий

Формула (2) описывает преобразование модели изделия $S^P(A_1^\Pi)$ в полный электронный конструкторский макет изделия $S^P(A_1^K)$, формируемый на стадии рабочего проектирования и выпуска электронной конструкторской документации.

Исходной моделью изделия $S^P(A_1^\Pi)$ является электронный макет, степень детализации которого соответствует стадии эскизного проекта. Модель $S^P(A_1^\Pi)$ объединяет в виде трехмерной цифровой модели следующую информацию:

- математическую модель поверхности (ММП);
- конструктивно-силовую схему (КСС);
- схему раскрытия обшивок (нанесенную на ММП);
- компоновку внутренних объемов;
- схемы трасс и коммуникаций бортовых систем;
- кинематические схемы подвижных элементов;
- схемы основных конструкторских и эксплуатационных стыков и разъемов.

При создании $S^P(A_1^\Pi)$ моделируются основные силовые конструктивные элементы, а вспомогательные элементы конструкции в электронный макет стадии эскизного проекта, как правило, не включаются. Сборные элементы исполняются как условно монолитные, стыки, разъемы и основные соединения моделируются схематично, готовые изделия включаются в виде габаритных макетов.

Порождающая конструкторская модель изделия $S^\Pi(A_1^\Pi)$ описывает состав и последовательность процедур структурного, геометрического и параметрического синтеза, реализуемых при создании электронного макета. При этом выполняются следующие геометрические построения:

- формирование по внешней поверхности обшивок их внутренних поверхностей (с учетом толщин обшивок, усилений, зон химического фрезерования и т. д.);
- конструирование и моделирование силовых элементов каркаса и их стыков; вспомогательных элементов конструкции и соединений (заклепочных, болтовых, сварных и т. д.).

Для формирования электронного макета $S^P(A_1^K)$ используются параметрические модели структурных элемен-

тов первого уровня — конструктивных элементов деталей и сборочных единиц различных классов. Для моделирования листовых деталей в библиотеку типовых конструктивных элементов входят модели рифтов, отбортовок, выштамповок, отверстий облегчения, вырезов и т. д.; для моделирования механообрабатываемых деталей — модели ребер, карманов, пазов, отверстий и т. д. Геометрические параметры этих элементов стандартизованы, а программы построения позволяют автоматически формировать геометрическую модель элемента для последующей вставки в геометрическую модель детали. Привязка и вставка в "тело" детали моделей типовых конструктивных элементов осуществляются исходя из требований прочности, жесткости и с учетом обеспечения необходимых радиусов сопряжений, поверхностей переходов, перемычек и зазоров с другими элементами конструкции.

Для формирования моделей сборочных единиц используют данные библиотеки стандартных крепежных элементов и справочников материалов (герметиков, клеев, грунтов и т. д.). Формирование электронного макета сборочной единицы осуществляется из геометрических моделей деталей, но моделирование самих деталей производится "в контексте сборки", т. е. сопрягаемые поверхности увязываются между собой в 3D-пространстве с использованием возможностей CAD-систем. Ассоциативные связи между элементами сборочной единицы позволяют автоматически корректировать геометрию сопрягаемых поверхностей при изменении одной из деталей.

Процедурно-алгоритмическая среда реализует алгоритмы формирования конструкторской модели изделия и объединяет отдельные цепочки построения геометрических моделей входящих элементов (дерево построения). Она включает в себя как автоматические процедуры (формирование геометрии библиотечных элементов), так и неавтоматизированные, выполняемые пользователем. Механизмы ассоциативности и параметризации позволяют формировать различные варианты электронного макета, сохраняя целостность сборки в определенных областях изменения параметров.

Результирующая конструкторская модель изделия $S^P(A_1^K)$ является его электронным макетом:

$$S^P(A_1^K) = \{S^S(A_1^K), S^N(A_1^K), S^\Gamma(A_1^K)\}, \quad (6)$$

где $S^S(A_1^K)$ — структурная модель (конструктивная электронная структура изделия (КЭСИ)); $S^N(A_1^K)$ — параметрическая модель (атрибутивная модель изделия); $S^\Gamma(A_1^K)$ — геометрическая модель (полная твердотельная модель изделия).

Одному и тому же элементу КЭСИ могут соответствовать различные геометрические модели в зависимости от их дальнейшего использования. Так, например, геометрическая модель детали, используемая для проектирования технологии ее изготовления, должна быть точной и содержать всю необходимую для технолога информацию (по аналогии с детализовочным чертежом). Геометрическая модель детали, входящая в электронный макет сборки, может быть выполнена упрощенно с высокоточным заданием поверхностей сопряжения и соединения (по аналогии со сборочным чертежом). Структурные элементы могут иметь различные варианты исполнения, поэтому КЭСИ является иерархическим графом, имеющим "и/или" вершины. Программная среда

должна позволять управлять формой изделия и формировать структуру, состоящую из "и" вершин под конкретный серийный номер изделия. Атрибутивная модель должна содержать данные, необходимые для изготовления, которые в условиях бумажного документооборота задавались в чертежах.

Технологические модели изделий

Формула (3) описывает процесс формирования комплекса технологических моделей изделия, состав которых должен соответствовать структуре процесса его производства. Поэтому выделяются два основных класса технологических моделей: модели деталей, описывающие их состояние в процессах изготовления, и модели сборочных единиц (СЕ), описывающие их состояние в ходе технологических процессов сборки.

Сборка — часть производственного процесса, является сложным многоуровневым процессом, который обычно описывается схемой сборки. В самолетостроении выделяют уровни узловой, агрегатной и общей сборки. Схему сборки разрабатывают на основании схемы конструктивно-технологического членения, определяют состав технологических подборок и последовательность их формирования. Технологическая электронная структура изделия (ТЭСИ) описывает входимость составных частей изделия в технологические под сборки разных уровней и представляется в виде графа — дерева. Иерархические связи являются внешними связями технологических СЕ, а связи между составными частями сборочной единицы являются ее внутренними структурными связями. Технологические модели СЕ должны иметь одинаковую структуру описания на любом уровне иерархии.

При моделировании процессов в цифровой информационной среде технологической моделью СЕ является ее технологический электронный макет (ТЭМ СЕ), содержащий описание различных конструктивно-технологических свойств, в том числе геометрическую модель СЕ.

В связи с тем, что модель технологического процесса является многоуровневой и многоэтапной, преобразование формулы (3) реализуется при моделировании технологических операторов любого уровня. Поэтому комплекс технологических моделей изделия также является многоуровневой системой, соответствующей структуре технологического процесса.

Исходной моделью изделия для преобразования формулы (3) на уровне технологического процесса является его конструкторский электронный макет, сформированный в соответствии с выражением (2). Он используется для формирования технологической модели, отражающей конечное состояние сборочной единицы $S^P(A_1^T)_K$ в соответствии с техническими требованиями на сборку. Перед началом проектирования технологического процесса формируется исходное состояние технологической модели $S^P(A_1^T)_0$, соответствующее условиям поставки составных частей на сборку. При проектировании технологического процесса формируются промежуточные состояния технологической модели $S^P(A_1^T)_i$. Каждое промежуточное состояние $S^P(A_1^T)_i$ представляет электронный макет СЕ, интегрирующий все изменения, накопившиеся в исходном технологическом макете на момент реализации технологического оператора.

Технологическая электронная модель СЕ может быть описана аналогично конструкторской модели изделия:

$$S^P(A_1^T) = \{S^S(A_1^T), S^N(A_1^T), S^G(A_1^T)\}, \quad (7)$$

где $S^S(A_1^T)$ — структурная модель (технологическая электронная структура изделия (ТЭСИ)), $S^N(A_1^T)$, $S^G(A_1^T)$ — параметрическая и геометрическая технологическая модель изделия соответственно.

Структура СЕ обычно описывается графом $G(A, C)$ (A — множество составных частей, C — множество соединений — механических связей между составными частями). Поэтому при разработке технологической модели СЕ целесообразно рассматривать два этих класса объектов и связи между ними:

$$S(A_1^T) = \{S(A_i^C), S(C_i^A), R_i^{AC}\}, \quad (8)$$

где $S(A_i^C)$ — модель составных частей СЕ; $S(C_i^A)$ — модель соединений СЕ; R_i^{AC} — взаимосвязь между моделями составных частей и соединений.

Структурными элементами модели $S(A_i^C)$ являются детали, технологические под сборки нижних уровней (условно монолитные элементы), материалы (герметики, теплозащитные покрытия и т. д.), а также элементы технологической оснастки, участвующие в технологическом процессе (макетные элементы, целевые знаки, заглушки, крышки и т. д.).

Структурными элементами модели $S(C_i^A)$ являются крепежные точки и соединительные швы. Под крепежной точкой будем понимать механическую связь, включающую в себя соединительный элемент (монолитный или сборный), и сопрягаемые с ним поверхности составных частей. В состав крепежной точки могут входить материалы в виде клеевых пленок и зон герметизации. Под соединительным швом (заклепочным, болтовым и т. д.) будем понимать совокупность крепежных точек, объединенных по общности конструктивно-технологических свойств (составу деталей пакета, типоразмеру соединительных элементов, методу выполнения соединения). В состав модели соединения может включаться технологический крепеж, устанавливаемый и снимаемый в ходе технологического процесса.

Введение материала в структуру электронного макета вызвано тем, что герметики, клеевые пленки, теплозащитные покрытия и другие материалы влияют на геометрию изделия и должны учитываться при формировании электронного макета. Соединения (механические связи) являются производными объектами, поскольку формируются из соединительных элементов и поверхностей (КТЭ) соединяемых деталей.

Для описания припусков, технологических баз, поверхностей под соединения и т. д. необходимо задавать и управлять геометрией отдельных поверхностей или комплексов поверхностей, поэтому модель составных частей и модель соединений должны структурироваться до уровня конструктивно-технологических элементов. Это позволяет не только идентифицировать на электронном макете эти элементы при моделировании технологического процесса, но и описывать связи R^{AC} между моделями $S(A_i^C)$ и $S(C_i^A)$ (поверхности деталей и подборок

и СТО. Рассмотрим более подробно модель $S^P(T_1^A)$, получаемую в соответствии с преобразованием (4).

Результирующая модель технологического процесса сборки $S^P(T_1^A)$ является формализованным описанием комплекса работ по установке и соединению составных частей СЕ с целью получения конструкций, отвечающих заданным требованиям. Она является компьютерной моделью, реализуемой в информационно-программной среде, описывает взаимодействия и изменения СЕ и элементов производственно-технологической среды в ходе технологического процесса сборки. Структурными элементами модели являются технологические операторы, соответствующие операциям и переходам различных видов работ.

При интерпретации моделей технологического процесса средствами автоматизированной системы могут реализовываться следующие процедуры:

- автоматизированное получение комплекта технологической документации с использованием редактора технологических документов системы проектирования;
- формирование анимационного фильма с использованием визуализатора технологического процесса системы проектирования;
- выбор информации из модели технологического процесса и передача ее в среду других информационных систем (например в систему планирования и управления производством).

С учетом специфики задач проектирования технологического процесса сборки его модель должна соответствовать следующим требованиям:

- дискретности, т. е. описывать нелинейное изменение структуры, параметров и геометрии изделия в результате выполнения технологических операторов;
- динамичности, т. е. описывать взаимодействия объектов технологии в пространстве и во времени;
- структурированности, отражающей иерархическое разбиение процесса на операции, переходы, проходы, рабочие движения;
- интерпретируемости и детерминированности, т. е. возможности однозначной интерпретации с детализацией, соответствующей определенному уровню, если свойства и параметры модели на заданном уровне полностью определены.

Модель технологического процесса $S(T^A)$ будем представлять в виде трех составляющих моделей:

$$S(T^A) = \{S^\Phi(T^A), S^N(T^A), S^S(T^A)\}, \quad (10)$$

где $S^\Phi(T^A)$, $S^N(T^A)$, $S^S(T^A)$ — соответственно функциональная, параметрическая и структурная модели.

Функциональная модель технологического процесса описывает преобразование технологической модели изделия в ходе технологического процесса. С учетом структуры технологической модели сборочной единицы (7) функциональная модель технологического процесса описывается следующим образом:

$$S^\Phi(T^A) = \{S^{\Phi S}(T^A), S^{\Phi N}(T^A), S^{\Phi \Gamma}(T^A)\}, \quad (11)$$

где отображения

$$S^{\Phi S}(T^A) = \Phi_T : S^S(A^T)_0 \rightarrow S^S(A^T)_K;$$

$$S^{\Phi N}(T^A) = \Phi_T : S^N(A^T)_0 \rightarrow S^N(A^T)_K;$$

$$S^{\Phi \Gamma}(T^A) = \Phi_T : S^\Gamma(A^T)_0 \rightarrow S^\Gamma(A^T)_K$$

описывают соответственно преобразования структурной $S^S(A^T)$, параметрической $S^N(A^T)$ и геометрической $S^\Gamma(A^T)$ моделей изделия из начального в конечное состояние.

Параметрическая модель технологического процесса включает идентификационную часть (наименование, обозначение, применяемость, статус), технические требования к выполнению, технико-экономические параметры (трудоемкость, цикл, расходуемые ресурсы).

Структурная модель технологического процесса отражает его декомпозицию на элементы (операции, переходы, рабочие движения) и описывается иерархическим графом-деревом. На каждом иерархическом уровне модель технологического процесса представляется в виде множества моделей технологических операторов:

$$S^P(T^A)^J = (S(\tau_1^J), S(\tau_2^J), \dots, S(\tau_i^J), \dots, S(\tau_k^J)), \quad (12)$$

где $S(\tau_i^J)$ — модель i -го технологического оператора уровня J .

Модель технологического оператора любого уровня может быть представлена в виде системы взаимосвязанных моделей, описывающих различные группы его свойств:

$$S(\tau_i^J) = \{S^\Phi(\tau_i^J), S^N(\tau_i^J), S^S(\tau_i^J)\}, \quad (13)$$

где $S^\Phi(\tau_i^J)$, $S^N(\tau_i^J)$, $S^S(\tau_i^J)$ — функциональная, параметрическая и структурная модели оператора τ_i^J .

Функциональная модель содержит описание вида, объекта и результата воздействия технологического оператора на объект (изделие или элемент производственной системы).

Параметрическая модель включает описание идентификационной части, качественных параметров, характеризующих методы и приемы выполнения работы, количественных параметров (технологические режимы и технико-экономические показатели) и лингвистических параметров, описывающих слова и словосочетания, используемые в виде вставок при формировании структурированных текстовых фраз, отражающих содержание технологических операций и переходов.

Структурная модель описывает взаимосвязи оператора $S^S(\tau_i^J)$ с операторами верхних и нижних иерархических уровней.

Если принять четырехуровневую структуру технологического процесса, то в соответствии с методологией системно-структурного анализа его полная модель может быть представлена следующим образом:

$$\begin{aligned} S(T^A)^1 &= \Phi_1^1 : S(A^T)_0 \rightarrow S(A^T)_K, S^N(T^A), \{\tau^2\}; \\ S(T^A)^2 &= \{\phi^2 \tau_i^2 : S(0)_{i-1} \rightarrow S(0)_i, S^N(\tau_i^2), i=1 \div n\}, R^{\tau^2}, \{\tau^3\}; \\ S(T^A)^3 &= \{\phi^3 \tau_j^3 : S(0)_{j-1} \rightarrow S(0)_j, S^N(\tau_j^3), j=1 \div k\}, R^{\tau^3}, \{\tau^4\}; \\ S(T^A)^4 &= \{\phi^4 \tau_l^4 : S(0)_{l-1} \rightarrow S(0)_l, S^N(\tau_l^4), l=1 \div q\}, R^{\tau^4}. \end{aligned} \quad (14)$$

На первом уровне описываются функция преобразования Φ_1^1 и параметры процесса $S^N(T^A)$ как целого, а также состав структурных элементов (операций) второго уровня $\{\tau^2\}$. На втором уровне для каждой операции τ_i^2

в свою очередь описываются реализуемое функциональное преобразование $\phi^2\tau^2$ и параметрическая модель этого преобразования $S^N(\tau_i^2)$, а кроме того, задаются связи между технологическими операторами этого уровня R^{τ^2} и состав технологических операторов третьего уровня $\{\tau^3\}$. R^{τ^2} отражают отношения предшествования-следования между операторами и характер их совмещения во времени: последовательное, параллельное, последовательно-параллельное. На третьем уровне аналогично описываются переходы технологической операции, на четвертом — структурные элементы переходов (приемы, рабочие движения), которые далее не детализируются. Операторы четвертого уровня привязаны к операторам третьего уровня, не отображаются в дереве технологического процесса и используются для анимации работы исполнителя с помощью антропометрического манекена.

Порождающая модель технологического процесса $S^{\Pi}(T_1^A)$ является моделью проектирования и содержит комплекс взаимосвязанных проектных процедур и операций, направленных на получение проектного решения в виде модели технологического процесса сборки на основании исходного описания изделия и производственно-технологической среды. Модель включает операции и процедуры, связанные с поиском и подготовкой необходимой исходной информации, формированием структуры технологического процесса, выполнением расчетов и оптимизацией технологического процесса.

$S^{\Pi}(T_1^A)$ является алгоритмической моделью, описывающей последовательность проектных процедур и операций по преобразованию исходных данных в модель технологического процесса. Она должна обладать свойствами дискретности (представление алгоритма в виде последовательности шагов), определенности (за конечное число шагов должен быть получен результат либо доказано его отсутствие), однозначности (при повторном применении алгоритма к тем же исходным данным должен быть получен тот же результат), возможности многократного применения к типовым объектам (с учетом ограничений).

Проектирование технологического процесса реализуется в автоматизированном режиме, т. е. часть процедур проектирования выполняется пользователем, часть — автоматизированной системой проектирования. Объем и степень сложности проектных процедур, выполняемых системой, определяют степень автоматизации проектирования и уровень интеллектуальной информационной поддержки процесса проектирования. Структурными элементами $S^{\Pi}(T_1^A)$ являются модели проектирования технологических операций и переходов по отдельным видам работ.

Основной информационной среды системы технологического проектирования являются базовые и комплексные технологические модули — представленные в программном виде алгоритмы проектирования технологических операций и переходов.

Базовый технологический модуль (БТМ) является первичным структурным элементом информационной среды технологического проектирования и представляет модель проектирования однопереходной типовой технологической операции. БТМ содержит идентификационную часть (дескриптор, наименование вида работ, иден-

тификаторы алгоритмов геометрических преобразований объектов, нормирования и расчета технологических параметров), постоянную информацию (текстовые формулировки типовой технологической операции, список ссылок на НТД), переменную информацию об изделии, условиях выбора способов выполнения работ и СТО, характеристики для определения норм времени и расчета технологических режимов. При классификации видов работ БТМ объединяются в группы по общности конструктивно-технологических свойств изделий и их элементов, а также способам выполнения работ.

КТМ — модель проектирования многопереходной типовой технологической операции, группы операций либо типового технологического процесса, представленная в виде совокупности БТМ, при обработке которой формируется модель технологического решения (операция, группа операций, технологический процесс). КТМ содержит идентификационную часть (дескриптор, наименование вида работ, идентификаторы входящих БТМ, алгоритмов нормирования и расчета технологических параметров), постоянную информацию (текстовые формулировки операций и переходов), условия включения входящих БТМ в результирующую модель технологического процесса.

Процедурно-алгоритмическая среда предоставляет возможность пользователю осуществлять синтез модели $S^{\Pi}(T_1^A)$ путем привязки БТМ — КТМ к соответствующим элементам изделия и технологической оснастки. Сформированная цепочка модулей является структурно-параметрической моделью проектирования технологического процесса. Обработка (расчет) этой модели средствами процедурно-алгоритмической среды при фиксированных значениях параметров изделия позволяет сформировать вариант (результирующую модель) технологического процесса. При этом могут рассчитываться различные варианты структуры технологического процесса.

Модели технологического оснащения

Проектирование и изготовление технологического оснащения является одним из основных процессов технологической подготовки производства. Объемы оснащения, необходимого для производства самолета, велики, а затраты на его создание составляют значительную долю в технологической себестоимости изделия. Переход на цифровые технологии проектирования позволяет перейти на цифровые технологии производства. При этом меняется структура процессов переноса геометрической информации с первоисточника (электронной модели) на изделие, состав оснастки и схемы ее увязки. Формирование электронных макетов изделия и проектирование по ним технологической оснастки для изготовления и сборки изделия позволяют заложить в электронные макеты систему технологических баз (базовые и сборочные отверстия), перенести их на технологическую оснастку, реализовать на элементах изделия и собрать изделие в приспособлениях упрощенной конструкции. При этом изготовление деталей и элементов оснастки осуществляется на оборудовании с ЧПУ, монтаж ступеней, контроль оснастки и изделия — при помощи современных координатно-измерительных систем контактного и бесконтактного типа [10]. Переход на цифровые технологии проектирования и производства обеспечивает высокое качество изделия за счет высокоточной реализации технологических баз и новых методов контроля, снижение трудоемкости и сокращение циклов сборки за счет уменьшения

объема или исключения подгоночных работ. Однако реализация этих методов требует больших затрат на техническое перевооружение предприятия.

Формула (5) описывает принципиальную схему процесса проектирования технологического оснащения. При этом результирующая модель оснастки формируется с использованием модели технологического процесса, включающим геометрическую модель изделия. При проектировании сборочных приспособлений позиционирование базовых и фиксирующих элементов приспособлений осуществляется по технологическому электронному макету сборочной единицы. Формирование порождающей модели выполняется с использованием библиотеки параметрических моделей типовых конструктивных элементов [11]. Процедурно-алгоритмическая среда, используемая при проектировании оснастки, по своим функциональным возможностям аналогична среде проектирования изделия.

Интеллектуальная информационная поддержка процессов конструкторско-технологического проектирования

В системе "ТеМП" автоматизирован ряд функций, которые могут быть отнесены к разряду интеллектуальных:

— конструктивно-технологический анализ и отработка электронных макетов изделия (выявление неувязок, проверка зазоров и радиусовгиба трубопроводов, анализ рабочих зон с использованием макетов оборудования и антропометрических манекенов исполнителей);

— формирование технологических моделей соединений (дерева соединительных швов, состава крепежных элементов, сопрягаемых деталей, поверхностей соединяемых деталей, параметров соединений);

— анализ моделей технологического процесса (технологическая завершенность СЕ, анализ соответствия содержания рабочих технологических процессов требованиям директивной технологии).

В последнее время возрастает интерес к автоматизированным системам, реализующим интеллектуальную информационную поддержку процессов жизненного цикла изделия, с помощью которых можно реализовать концепцию проектирования под заданную стоимость. Основным средством, обеспечивающим сквозную экономическую оценку при компьютерном проектировании новых летательных аппаратов, должна стать система экспертных оценок (СЭО). Основываясь на разработанных ранее методиках оценки и отработки изделий на производственную, эксплуатационную и ремонтную технологичность, СЭО должна позволить осуществлять выбор эффективных КТР на ранних стадиях жизненного цикла изделия. При этом данную систему невозможно купить, поскольку она содержит фирменные "ноу-хау" и является индивидуальной для каждого предприятия [12].

Системы конструкторско-технологического проектирования, функционирующие на базе алгоритмических моделей (система "ТеМП") или построенные на принципах экспертных систем, в которых решение получают на основе обработки продукционных моделей, должны оперировать с большим объемом структурированных данных. Для создания моделей объектов и процессов разрабатываются их классификаторы, которые, как правило, имеют многоуровневую структуру и включают большое число параметров. Так, например, классификатор и язык описания конструктивно-технологических свойств меха-

нообрабатываемых деталей содержат несколько десятков типов обрабатываемых поверхностей (элементарных и комплексных), для каждой из которой необходимо задавать свой состав параметров [4]. В условиях бумажного документооборота формирование технологической модели изделия осуществлялось на основе чертежей. При этом для формирования структуры модели и описания ее свойств использовали классификаторы и таблицы кодирования. Процесс подготовки исходных данных был трудоемким и существенно снижал эффективность систем проектирования.

Переход на цифровые технологии и электронное макетирование создает принципиально новые возможности для разработки интеллектуальных систем. Электронный макет, являясь математическим объектом, пригоден для решения задач по его анализу для автоматизированного формирования структуры и параметров технологических объектов под различные классификационные схемы, используемые в системах технологического проектирования. Для этого можно использовать методологию интеграции на базе конструктивно-технологических элементов, при которой в соответствии со схемой (см. рис. 1) каждому конструктивному элементу может соответствовать его технологическая модель, что и позволяет параллельно с конструктивной структурой изделия формировать его технологическую структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Технология сборки самолетов* / В. И. Ершов, В. В. Павлов, М. Ф. Каширин, В. С. Хухорев. М.: Машиностроение, 1986. 456 с.
2. *Бабушкин А. И.* Моделирование и оптимизация сборки летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1990. 240 с.
3. *Бабушкин А. И., Пархоменко Н. М., Кобелев В. А.* Использование типовых решений при проектировании рабочих технологических процессов агрегатной сборки // *Авиационная промышленность*. 1983. № 6. С. 10—12.
4. *Цветков В. Д.* Система автоматизации проектирования технологических процессов. М.: Машиностроение, 1972. 240 с.
5. *Уланов М. Е., Вежновец Н. П., Карьков В. И.* Создание отраслевой технологической информационной базы // *Авиационная промышленность*. 1982. № 12. С. 79—81.
6. *Самсонов О. С., Тарасов Ю. М.* Проблемы интеграции прикладных систем // *САПР и графика*. 2000. № 1. С. 42—46.
7. *Автоматизированная система подготовки агрегатно-сборочного производства* / О. С. Самсонов, А. В. Гахов, Д. В. Сосунов, И. И. Толстопятов // *Авиационная промышленность*. 2002. № 1. С. 32—36.
8. *Самсонов О. С.* Автоматизирование проектирование технологии сборочно-монтажных работ в системе "ТеМП" // *Технология машиностроения*. 2006. № 8. С. 44—48.
9. *Соколов В. П., Цырклов А. В.* Математическое, методическое и организационное обеспечение технологической подготовки производства. Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Киев: Техніка, 2001. С. 475—501.
10. *Современные технологии агрегатно-сборочного производства самолетов* / Пекарш А. И., Тарасов Ю. М., Кривов Г. А. и др. М.: Агаф-пресс, 2006. 304 с.
11. *Подсистема проектирования стапельно-сборочной оснастки* / О. С. Самсонов, Н. Ю. Каратаева, Ю. М. Тарасов и др. // *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 1998. № 1. С. 55.
12. *Кривов Г. А.* Эффективно организованная электронная технологическая среда — основа компьютерного проекта самолета // *Информационные технологии в наукоемком машиностроении*. Киев: Техніка, 2001. С. 327—398.

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

В. А. СИДЯКИН, канд. техн. наук
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Технология и оборудование стыковой сварки дугой низкого давления трубных переходников из разнородных металлов

Для сварки трубных переходников из разнородных металлов наибольшее применение находят способы сварки давлением — трением, клинопрессовая, прокаткой, взрывом и др.

Особенностью этих способов сварки является формирование соединений при значительных пластических деформациях, что исключает возможность сварки непосредственно трубных заготовок. Этими способами сваривают прутки или листы, а затем из полученных биметаллических заготовок обработкой резанием, штамповкой и другими способами получают трубные переходники. Для такой технологии характерны низкий коэффициент использования металла и большая трудоемкость операций. Кроме того, для сварки давлением отсутствуют объективные методы контроля качества, что не обеспечивает высокой надежности соединений. При этом получение качественных соединений затрудняется с уменьшением диаметра переходников.

Стыковая сварка дугой низкого давления [1—3] позволяет изготавливать трубные переходники путем сварки непосредственно трубных заготовок.

Процесс сварки осуществляется в вакуумной камере и состоит из двух этапов: нагрева торцов трубных заготовок и их осадки. Для нагрева торцов труб используется электрическая дуга переменного тока, горящая в зазоре между деталями в инертной среде низкого давления и равномерно распределенная по всей их торцовой поверхности.

Процесс формирования соединений при стыковой сварке дугой низкого давления имеет особенности, которые позволяют применять его для сварки многих разнородных металлов:

— сварка производится в инертной среде низкого давления, что снижает окисление и позволяет сваривать металлы, активно взаимодействующие с атмосферными газами;

— эффективно решается вопрос удаления поверхностных оксидных пленок с помощью катодной очистки торцов в электрическом дуговом разряде;

— на стадии нагрева детали не контактируют друг с другом и, следовательно, теплового и диффузионного взаимодействия свариваемых металлов при нагреве не происходит; что позволяет сравнительно легко управлять тепловым состоянием торцов и задерживает развитие объемного взаимодействия металлов.

Тепловое состояние торцов свариваемых деталей перед осадкой определяет условия образования межатомных связей и объемного взаимодействия металлов.

При стыковой сварке дугой низкого давления применяют две схемы формирования соединений: в жидком состоянии с расплавлением торцов обеих деталей и сварку-пайку. Выбор схемы формирования определяется характером взаимодействия свариваемых металлов.

Для многих пар разнородных металлов (алюминиевые сплавы со сталями и титановыми сплавами и др.) оптимальной схемой формирования соединений является сварка-пайка. В этом случае детали нагреваются до образования расплавленного слоя только на торце детали из более легкоплавкого металла. При осадке формирование межатомных связей происходит в процессе смачивания расплавленным металлом очищенного от оксидов и нагретого до определенной температуры, превышающей порог смачивания, торца детали из более тугоплавкого металла.

При формировании соединений по схеме сварки-пайки максимальная температура в контакте превышает температуру плавления более легкоплавкого металла на 200—300 К. При осадке за время менее 10^{-2} с в процессе выдавливания из стыка расплавленного металла и деформации высокотемпературной зоны соедине-

ния температура в контакте металлов становится ниже температуры плавления более легкоплавкого металла. Выдавливание расплавленного металла из стыка и относительно большая жесткость теплового режима ограничивают объемное взаимодействие металлов. Это позволяет получать соединения различных пар разнородных металлов, обладающих ограниченной взаимной растворимостью, без хрупкой интерметаллидной прослойки.

При сварке трубных переходников алюминий—сталь и алюминий—титан оптимальная температура торцов заготовок из стали и титана, при которой обеспечиваются высокие механические свойства переходников при статических и динамических нагрузках, составляет 800—950 °С.

В тех случаях, когда при сварке разнородных металлов избежать образования хрупких прослоек не удается, сварку можно выполнять через проставку из металла, исключаящие их взаимодействие.

Регулирование нагрева торцов труб из разнородных металлов осуществляется следующим образом.

При обычной схеме процесса (рис. 1, а) мощности тепловых потоков, поступающих на торцы трубных заготовок, приближенно равны и температура торцов обратно пропорциональна коэффициенту тепловой активности свариваемых металлов. Поэтому регулирование температуры торцов осуществляется путем выбора определенного соотношения толщин стенок трубных заготовок. Кроме того, уменьшение температуры торца трубной заготовки может быть достигнуто путем установки кольца из того же металла вблизи ее торца.

Возможно также отдельное регулирование нагрева торцов свариваемых заготовок. В этом случае (рис. 1, б) для нагрева торца заготовки, требующей большего тепловложения, кроме основной дуги 1 используется дополнительная дуга 2, горя-

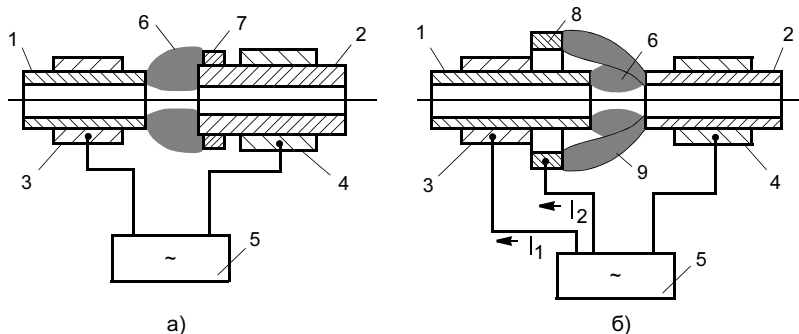


Рис. 1. Схема регулирования нагрева торцов труб из разнородных металлов (I_1, I_2 — ток основной и дополнительной дуги соответственно): а — выбором определенного соотношения толщин стенок труб; б — за счет применения дополнительной дуги; 1, 2 — свариваемые детали; 3, 4 — зажимы; 5 — источник питания дуги; 6 — основная дуга; 7 — кольцо; 8 — вспомогательный электрод; 9 — дополнительная дуга

щая между торцом и вспомогательным электродом 3. При таком нагреве оптимальное тепловое состояние торцов может быть получено практически при любом сочетании толщин стенок трубных заготовок.

Нагрев торцов трубных заготовок осуществляют в две стадии. Сначала производят импульсный нагрев торцов, при котором обеспечивается определенная глубина прогрева стенок труб до пластического состояния металла и температура торца заготовки из более легкоплавкого металла приближается к солидусу. Затем мощность дуги увеличивается и производится кратковременное оплавление торца заготовки из более легкоплавкого металла.

Для ограничения пульсаций температуры торцов и исключения их преждевременного оплавления импульсный нагрев производят при небольшой длительности импульсов 0,02—0,06 с и скважности 0,5. Такой импульсный нагрев улучшает равномерность распределения температуры на торцевых поверхностях и обеспечивает увеличение средней мощности дуги при переходе к стадии оплавления более чем в 2 раза, что стабилизирует формирование жидкого слоя.

Длительность стадии импульсного нагрева зависит от толщины стенок труб и составляет 1—3 с, а длительность оплавления находится в пределах 0,1—0,3 с.

Благодаря образованию сплошного тонкого слоя жидкого металла и катодной очистке поверхности торцов труб от оксидных плен роль осадки в формировании соединений по схеме сварки-пайки при стыковой сварке дугой низкого давления существенно отличается от роли деформации зоны соединения при других способах сварки давлением. В этом

случае не требуется значительная пластическая деформация для сглаживания неровностей торцевой поверхности, разрушения и удаления оксидных плен из зоны соединения. При осадке происходит быстрое сближение торцов, формирование межатомных связей в контакте твердой и жидкой фаз в процессе смачивания, выдавливание жидкого металла из стыка и небольшая деформация высокотемпературной зоны соединения под действием сжимающего усилия осадки, исключающая образование дефектов усадочного происхождения. Необходимое давление осадки при этом составляет 10—30 МПа.

Конструкция стыка переходников может быть различной. Это может быть обычное стыковое соединение двух труб (рис. 2, а). При необходимости увеличения прочности соединения толщина стенок трубных заготовок в зоне стыка должна быть увеличена (рис. 2, в). При изготовлении переходников алюминий—сталь прочность соединения может быть увеличена при утолщении стенки только заготовки из алюминиевого сплава. В этом случае прочность переходника воз-

растает за счет формирования нахлесточного стыкового соединения (рис. 2, б), а прочность переходника титан—алюминий может быть увеличена благодаря утолщению стенки трубы из титана при осадке (рис. 2, в).

Для улучшения механических свойств сварных соединений переходников, например, повышения ударной вязкости или исключения образования хрупких прослоек, сварка может быть осуществлена через одну или две проставки из специально подобранных металлов (рис. 2, д, е). Например, изготовление переходников АМг6 + 12Х18Н10Т включает два этапа: приварку кольцевой проставки из сплава АД1 к трубе из сплава АМг6 и последующую сварку заготовки из сплавов АМг6 + АД1 с трубой из стали. Сварка переходника сталь 12Х18Н10Т + сплав ВТ6С осуществляется через две проставки — из бронзы и ниобия. Сначала производят приварку кольцевых проставок из бронзы и ниобия соответственно к трубным заготовкам из стали и титана, а затем полученные заготовки сталь + бронза и титан + ниобий сваривают торцами из бронзы и ниобия. Все три соединения формируются по схеме сварки-пайки.

Стыковую сварку дугой низкого давления применяли для изготовления трубных переходников из алюминиевых сплавов АД1, АМц, АМг2 и АМг6 с аустенитной сталью 12Х18Н10Т и титановыми сплавами ВТ1, ОТ4 и ВТ6С, трубных переходников сталь 12Х18Н10Т + титановый сплав ВТ6С, медь М1 + сталь 12Х18Н10Т и др. [4—7].

На рис. 3 приведены примеры сварных соединений трубных переходников, выполненных стыковой сваркой дугой низкого давления. Кроме сварки трубных переходников стыковой сваркой дугой низкого давления можно приваривать концевую арматуру к элементам трубопроводов, выпол-

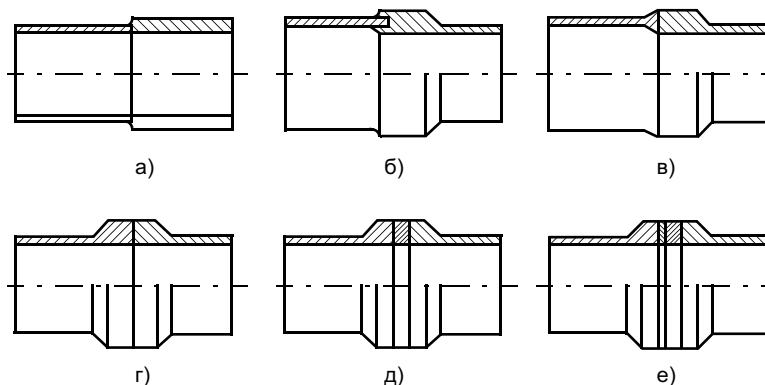


Рис. 2. Конструкции стыков сварных соединений трубных переходников

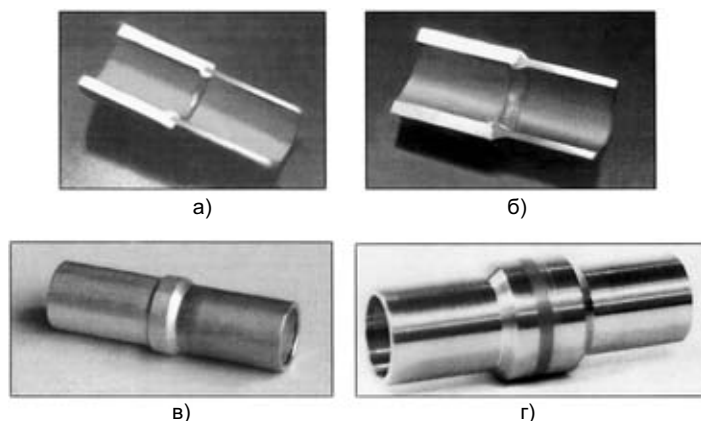


Рис. 3. Сварные соединения трубных переходников: а — разрез сварного соединения трубы из сплава АМг2 сечением ($d \times \delta$) $1,4 \times 2$ мм и трубы из стали 12Х18Н10Т сечением 12×1 мм; б — разрез сварного соединения трубы из сплава АМг2 сечением 14×2 мм и трубы из титана ВТ1 сечением 12×1 мм; в — трубный переходник АМг2 + 12Х18Н10Т ($d_y = 10$ мм); г — трубный переходник 12Х18Н10Т + ВТ6С ($d_y = 19$ мм)

ненных из разнородных металлов (рис. 4).

Технологический процесс сварки заготовок трубных переходников включает следующие этапы: подготовку торцов труб; сборку труб в зажимах сварочной установки; сварку труб с автоматическим контролем качества процесса сварки; выборочные испытания и неразрушающий контроль качества сварных соединений труб.

Подготовка трубных заготовок к сварке включает их торцовку и подготовку поверхности. Поверхность труб должна быть очищена от различных загрязнений и оксидных плен. Для этого трубы обезжиривают и подвергают химическому травлению по технологии подготовки поверхности деталей из аналогичных металлов под аргонодуговую сварку. Перед сваркой производят зачистку поверхности труб вблизи их торцов металлическими щетками на участке длиной 30 мм.

Сборка труб под сварку осуществляется в зажимах сварочной установки. При зажатии труб обеспечива-

ется определенный вылет за пределы зажима и определенный зазор между торцами труб.

Перед началом процесса сварки производят предварительную осадку торцов труб. В процессе предварительной осадки контролируют усилие осадки и фактическую величину зазора между торцами труб.

Процесс сварки включает следующие этапы: вакуумирование сварочной камеры до заданного остаточного давления воздуха, наполнение камеры до заданного абсолютного давления аргоном, нагрев торцов труб электрической дугой, осадку торцов труб, наполнение камеры атмосферным воздухом.

Ниже приведены установочные параметры режима сварки: l_0 — вылет труб из зажимов, Δ — зазор между торцами труб, p_0 — остаточное давление воздуха при вакуумировании камеры, p_{Ar} — абсолютное давление аргона, n — число импульсов тока дуги при нагреве, I_H — ток дуги при нагреве, t_H — длительность им-

пульсов при нагреве, t_n — длительность пауз при нагреве, $I_{опл}$ — ток дуги при оплавлении, $t_{опл}$ — длительность импульса оплавления, $F_{ос}$ — усилие осадки торцов труб, $t_{ос}$ — время выдержки усилия осадки.

Ток дуги в импульсах при нагреве и оплавлении характеризуется средним значением тока в течение полуволны переменного тока. На сварочной установке ток дуги задается максимальным значением I_M в полуволне и углом включения тока тиристорным прерывателем при нагреве α_H и оплавлении $\alpha_{опл}$.

Ориентировочные режимы сварки некоторых трубных заготовок приведены в таблице. Общие параметры: $p_0 = 1 \div 3$ Па, $p_{Ar} = 800$ Па, $t_H = t_n = 2$ периода, $t_{ос} = 5$ с.

Подбор режима и анализ качества формирования соединений осуществляют на образцах-свидетелях, подготовленных аналогично всей партии свариваемых заготовок. При подборе режима сварки контролируют качество стадии нагрева и оплавления торцов труб. Для этого выполняют все этапы процесса сварки по заданному режиму кроме осадки и анализируют состояние торцовых поверхностей труб к моменту включения осадки. Возможность оценки подготовок торцов к сварке перед осадкой является важным преимуществом стыковой сварки дугой низкого давления перед другими способами сварки давлением.

Образцы-свидетели подвергают механическим испытаниям и металлографическим исследованиям. Для получения наиболее полной информации о качестве формирования соединений трубных переходников проводят испытания на ударный изгиб.

Качество процесса сварки контролируют путем измерения и регистрации фактических значений контролируемых параметров. Регистрируются следующие параметры: остаточное давление воздуха при вакуумирова-

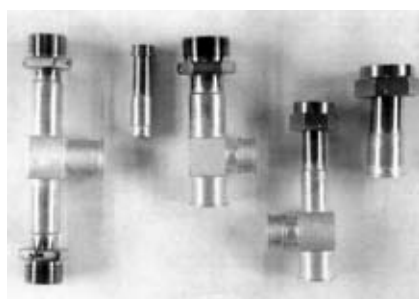


Рис. 4. Приварка концевой арматуры из стали 12Х18Н10Т к элементам трубопроводов из алюминиевых сплавов

Металл, сечение ($d \times \delta$), мм	l_0 , мм	Δ , мм	n	I_M , А	α_H , градус	$\alpha_{опл}$, градус	$t_{опл}$, с	$F_{ос}$, Н
АМг2 (14×2) 12Х18Н10Т (12×1)	4 6	3,0	7	420	50	40	0,16	500
АМг3 (16×4) ВТ6С (14×2)	8 10	3,5	14	650	45	40	0,20	1500
М1 ($12 \times 1,5$) 12Х18Н10Т (12×2)	4 6	3,0	8	750	45	35	0,14	700

Обозначения. d, δ — диаметр и толщина трубы соответственно.

нии; абсолютное давление аргона; средние значения тока и напряжения дуги положительных и отрицательных полувольт при нагреве и оплавлении; усилие осадки; длительность выдержки усилия осадки; величина осадки торцев.

Все приведенные параметры кроме осадки торцев и напряжения дуги определяются установочными параметрами, по которым производится настройка сварочной установки на заданный режим сварки.

Стабильность теплового состояния торцев определяется стабильностью параметров, определяющих режим горения дугового разряда, — током и напряжением дуги, а также длительностью импульсов тока и пауз между ними. Наличие различного рода загрязнений поверхности при плохой подготовке торцев труб приводит к снижению напряжения дуги и сопровождается уменьшением нагрева торцев.

Контроль усилия осадки и длительности его выдержки позволяет установить, что остывание зоны стыка сварного соединения происходит при достаточных напряжениях сжатия, исключающих возникновение растягивающих напряжений, при которых возможно образование дефектов усадочного характера.

Другим параметром, характеризующим процесс осадки, является осадка торцев в процессе выдавливания расплавленного металла и пластической деформации высокотемпературной зоны соединения.

Величина осадки определяется разностью между значениями перемещения подвижного зажима при осадке и начального зазора между торцами. Этот параметр в отличие от усилия осадки, которое является ус-

тановочным параметром, является зависимым. Величина осадки определяется как усилием осадки, так и тепловым состоянием торцев перед осадкой.

В условиях стыковой сварки дугой низкого давления, когда качество сварных соединений находится в прямой связи с образованием сплошного слоя расплавленного металла на торцах труб и давление осадки сравнительно невелико, величину осадки можно рассматривать как обобщенный параметр, характеризующий качество процесса сварки.

При сварке заготовок трубных переходников с толщиной стенки 1—3 мм величина осадки при оптимальном формировании соединений составляет 0,8—1,5 мм.

При сварке партии трубных переходников проводят выборочные испытания сварных соединений на статический или ударный изгиб и испытания внутренним давлением до разрушения.

Неразрушающий контроль сварных соединений включает внешний осмотр и измерения соединений, рентгенографический контроль и контроль герметичности.

Следует отметить большую информативность визуального контроля сварных соединений, полученных стыковой сваркой дугой низкого давления. Сварные соединения трубных переходников из разнородных металлов формируются по схеме сварки-пайки. Поэтому необходимым условием отсутствия непровара в соединениях является смачивание и растекание расплавленного металла трубы из более легкоплавкого металла по торцу трубы из более тугоплавкого металла. Отсутствие этих характерных признаков качественного форми-

рования соединений легко выявляется внешним осмотром.

Сварку заготовок трубных переходников производят на установке "Стык-3" [8] (рис. 5, а).

Техническая характеристика установки

Размеры свариваемых заготовок, мм:	
диаметр труб.	6—26
толщина стенки.	1—4
диаметр стержней.	3—16
Диапазон изменения сварочного тока, А.	
Число импульсов сварочного тока.	1—100
Длительность импульсов тока, с.	0,02—2,00
Длительность пауз, с.	0,02—2,00
Давление в камере при вакуумировании, Па.	1—3
Давление аргона в камере при сварке, Па.	600—1000
Расстояние между зажимами, мм.	5—40
Ход подвижного зажима при осадке, мм.	0—12
Усилие осадки, Н.	200—4000
Габаритные размеры, мм.	
Масса, кг.	1700 × 1100 × 800 400

Основными элементами установки являются сварочный модуль, система вакуумирования и газопитания, силовая электрическая схема питания сварочной дуги, программатор сварочного цикла.

Сварочный модуль содержит вакуумную камеру, в которой на двух направляющих размещены рычажно-винтовые зажимы свариваемых деталей и механизм осадки, установленный на тех же направляющих снаружи камеры. Направляющие закреплены на левом фланце камеры, который установлен на тележку. При перемещении тележки вправо зажимы выводятся из камеры. Механизм осадки электромагнитного типа состоит из электромагнита и пружинного стабилизатора усилия осадки.

Вакуумирование сварочной камеры производится механическим вакуумным насосом, а заданное рабочее давление аргона создается путем подачи определенной порции газа из дозатора. Давление рассчитывают по формуле $p_{Ar} = k\Delta p_d$, где k — постоянная дозатора, зависящая от соотношения объемов дозатора и камеры, определяется экспериментально; Δp_d — изменение давления в дозаторе при наполнении камеры.

Силовая электрическая схема обеспечивает питание электрической дуги переменным током промышленной частоты в импульсном

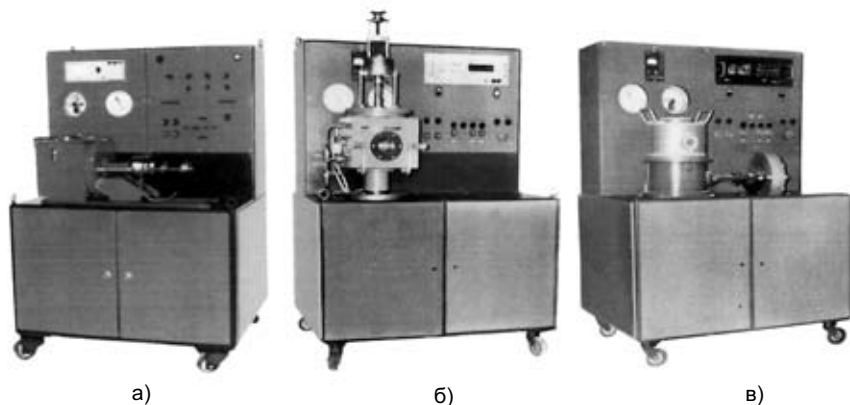


Рис. 5. Сварочная установка "Стык-3": а — основной вариант установки; б — установка с вертикальным расположением осей свариваемых заготовок; в — то же, с пневмодиафрагменным механизмом осадки

режиме и состоит из сварочного трансформатора, тиристорного прерывателя, балластного реостата и схемы стабилизации дуги.

Сварочный трансформатор представляет собой однофазный трансформатор с жесткой ВАХ с напряжением холостого хода 120 В. Тиристорный прерыватель обеспечивает синхронное включение и плавную регулировку сварочного тока. Балластный реостат служит для ступенчатого регулирования сварочного тока. Включение секций балластного реостата в сварочную цепь происходит автоматически с помощью электромагнитных контакторов.

Стабилизация дуги осуществляется возбуждением между торцами свариваемых деталей вспомогательной (инициирующей) дуги в начале каждой полуволны переменного тока от дополнительного трансформатора с напряжением холостого хода 500 В.

Программатор сварочного цикла управляет сварочным током и включает механизм осадки. Он обеспечивает выполнение заданной циклограммы тока — задает число импульсов нагрева, длительность импульсов и пауз между ними, длительность импульса оплавления, а также регулирует сварочный ток путем изменения угла включения тиристоров. По схемным решениям и элементной базе программатор сварочного цикла установки "Стык-3" подобен регуляторам времени для контактной точечной сварки, например регулятору РВИ-501.

На рис. 5, б приведен вариант установки "Стык-3" с вертикальным расположением сварочного модуля. В этом случае оси свариваемых заготовок располагаются вертикально и практически исключается неравномерность оплавления торцов из-за стекания жидкого металла под действием силы тяжести. Такое расположение сварочного модуля целесообразно при диаметре трубных заготовок более 25 мм с толщиной стенки более 4 мм.

Для обеспечения возможности сварки трубных заготовок диаметром до 50 мм и толщиной стенки 6 мм разработан сварочный модуль с пневмодиафрагменным механизмом осадки (рис. 5, в) и усилием осадки до 10 кН.

С целью расширения технологических возможностей установки "Стык-3", повышения стабильности формирования сварных соединений и надежности трубных переходников проведена ее модернизация. Современный вариант установки приведен



Рис. 6. Установка "Стык-3К" с компьютерным управлением и контролем процесса сварки

на рис. 6. Управление процессом сварки и контроль качества процесса сварки по его параметрам на установке "Стык-3К" осуществляются с помощью компьютерной системы контроля и управления. Ее структурная схема приведена на рис. 7. Она включает собственно сварочную установку "Стык-3К" и компьютерный модуль, связанные между собой блоком согласования. Конструктивно компьютерный модуль и блок согласования расположены в отдельной стойке рядом с установкой.

В сварочной установке расположены датчики контролируемых параметров процесса и исполнительные устройства. Блок согласования обеспечивает нормализацию сигналов датчиков контролируемых параметров и сигналов управления. В качестве компьютерного модуля использован малогабаритный промышленный компьютер, совместимый с IBM PC/AT.

В компьютере установлены адаптеры аналогового ввода, дискретного ввода-вывода и адаптер счетчиков-таймеров.

Система контроля и управления содержит следующие датчики: вакуума в сварочной камере, абсолютного давления аргона в сварочной камере, тока дуги, напряжения дуги, перемещения подвижного зажима, усилия осадки.

Для измерения остаточного давления воздуха при вакуумировании сварочной камеры служит манометрический тепловой термометрический преобразователь ПМТ-4М.

Измерение абсолютного давления аргона в сварочной камере производится датчиком давления "Сапфир-22МП" с диапазоном давлений от 0 до 4 кПа.

Датчик тока представляет измерительный трансформатор тока, включенный в цепь питания дуги, нагрузкой которого является калиброванный резистор.

В качестве датчика напряжения дуги использована измерительная схема, которая также выполнена на трансформаторе тока. Сигнал с нагрузочного резистора во вторичной обмотке этого трансформатора пропорционален напряжению дуги, так как его первичная обмотка через калиброванный нагрузочный резистор подключена на дуговой промежуток.

Для защиты измерительной схемы от высокого напряжения и исключения ее влияния на процесс зажигания дуги датчик напряжения подключен к дуговому промежутку через тиристорный прерыватель, который включается по переднему фронту по-

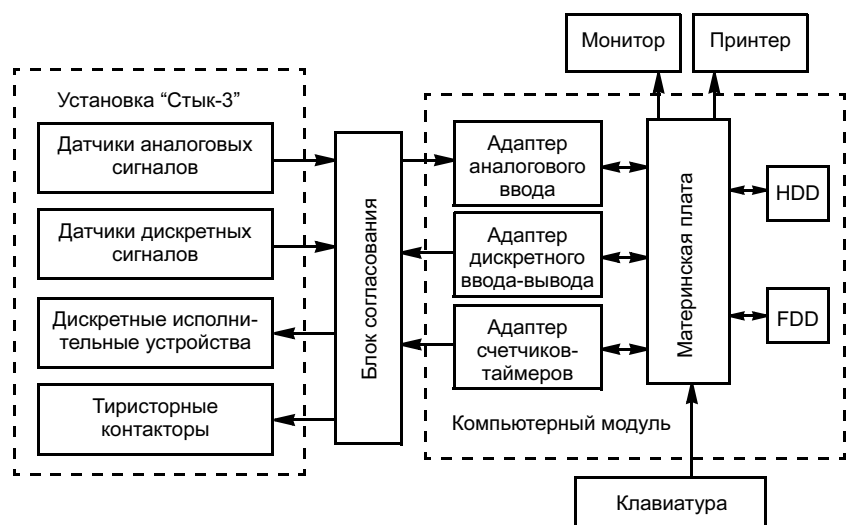


Рис. 7. Структурная схема системы компьютерного контроля и управления процессом сварки

лупериодов тока дуги после ее зажигания.

В качестве датчика перемещения подвижного зажима при осадке использован датчик линейного перемещения потенциометрического типа ММ15 фирмы "MEGATRON". Параметры датчика: предел измерения 15 мм, погрешность 0,01 мм, максимальная скорость движения 2 м/с.

Для измерения усилия осадки служит датчик силы тензометрического типа, установленный соосно со штоком механизма осадки, для измерения усилия осадки — сменные датчики со следующими диапазонами измерения силы: 0—1000, 0—5000 и 0—10 000 Н.

В установке применены следующие исполнительные устройства: клапаны с электромагнитным управлением для вакуумирования камеры и напуска в нее атмосферного воздуха, напуска аргона в дозатор и вакуумную камеру; электромагнитные контакторы для подключения сварочного трансформатора к силовой электросети, включения секций балластного реостата и контроля работы силовой электрической схемы в режиме короткого замыкания; тиристорный прерыватель для управления сварочным током; тиристорный и электромагнитный контакторы для управления механизмом осадки.

Для контроля и управления процессом сварки разработан программный модуль "STYK". При разработке программного модуля использованы компилятор GNU C/C++ и библиотека

быстрой графики OpenGL (FastGL) для работы в операционной системе DOS.

Программный модуль "STYK" обеспечивает выполнение следующих работ: введение и запись в файл параметров режима сварки и параметров настройки элементов сварочного оборудования; контроль работы отдельных узлов сварочной установки; сварку в автоматическом режиме.

При работе в автоматическом режиме все этапы процесса сварки — вакуумирование сварочной камеры, наполнение ее аргоном, нагрев торцов свариваемых заготовок электрической дугой, осадка торцов заготовок и наполнение камеры атмосферным воздухом — осуществляются автоматически. При сварке обеспечивается стабилизация нагрева торцов свариваемых заготовок при наличии колебаний напряжения силовой электросети.

При работе в автоматическом режиме на экране монитора изображается мнемосхема установки (рис. 8), отображающая все этапы процесса сварки.

Клавиатура компьютера используется только при настройке установки на заданный режим сварки и контроле работы отдельных ее узлов.

При работе в автоматическом режиме процесс сварки включается кнопкой "Пуск — Автомат", установленной на панели управления сварочной установки.

При сварке партии изделий настройка установки на текущий режим

сварки производится автоматически при включении питания установки.

При сварке установочные и контролируемые параметры процесса регистрируются в виде файлов в памяти компьютера, что позволяет провести последующий анализ процесса сварки по значениям параметров и осциллограммам, представленным на экране монитора. При необходимости значения установочных и контролируемых параметров процесса сварки могут быть распечатаны на принтере.

Стыковую сварку дугой низкого давления трубных переходников из разнородных металлов применяют в промышленности при изготовлении элементов конструкций космических аппаратов (НПО им. С. А. Лавочкина), криогенной техники (НПО "Кислород-маш", Одесса) и др.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Новый способ стыковой сварки труб малого диаметра / А. Н. Сабанцев, Б. Д. Орлов, В. А. Сидякин, Е. А. Мачнев // Сварочное производство. 1977. № 2. С. 13—14.*
2. *Сидякин В. А. Стыковая сварка оплавлением дугой низкого давления // Новое в технологии контактной сварки. М.: Машиностроение, 1981. С. 25—44.*
3. *Сидякин В. А., Мачнев Е. А. Стыковая сварка дугой низкого давления разнородных металлов // Сварочное производство, 1985. № 2. С. 9—11.*
4. *Стыковая сварка с нагревом дугой низкого давления трубных сталеалюминиевых переходников для криогенных систем и аппаратов / В. А. Веселов, В. А. Сидякин, В. Р. Рябов и др. // Автоматическая сварка. 1990. № 4. С. 50—55.*
5. *Формирование структуры переходной зоны сталеалюминиевых переходников при стыковой сварке с нагревом дугой низкого давления / А. Н. Муравейник, В. Р. Рябов, В. А. Сидякин и др. // Автоматическая сварка. 1990. № 6. С. 34—38.*
6. *Стыковая сварка дугой низкого давления кронштейнов из разнородных сплавов АМг6 + ОТ4 / В. А. Сидякин, Д. Н. Боков, В. М. Арбузов, В. С. Хаустов // Технология машиностроения. 2001. № 6. С. 29—33.*
7. *Стыковая сварка трубных переходников сталь — титан / В. А. Сидякин, Д. К. Печенкин, В. М. Арбузов, В. С. Хаустов // Сварочное производство. 2004. № 7. С. 17—22.*
8. *Установка "Стык-3" для стыковой сварки с нагревом электрической дугой низкого давления / В. А. Сидякин, А. Н. Сабанцев, В. В. Орлов, Е. А. Мачнев // Электротехническая промышленность. Сер. Электросварка. 1984. Вып. 4 (85). С. 8—10.*

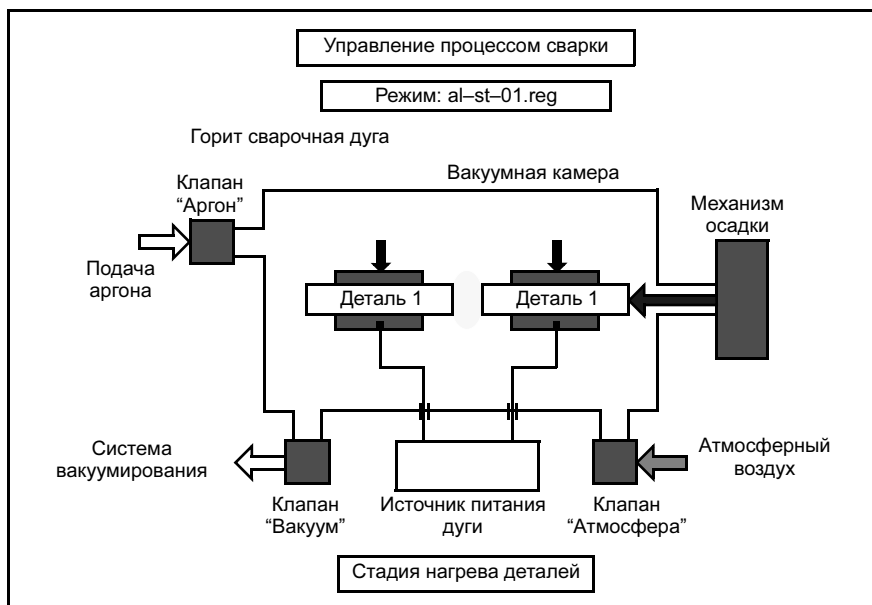


Рис. 8. Изображение на экране монитора при автоматическом режиме работы установки

ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

А. А. ИЛЬИН, д-р техн. наук, В. С. СПЕКТОР, канд. техн. наук, С. М. САРЫЧЕВ, канд. техн. наук ("МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского),
В. В. ПЛИХУНОВ, канд. техн. наук, Л. М. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, С. Б. ИВАНЧУК, инж. (ОАО "НИАТ")

Вакуумные ионно-плазменные технологии и перспективы их применения в машиностроении¹

Работоспособность изделий из конструкционных материалов во многом определяется структурным состоянием и комплексом физико-химических и технологических свойств поверхностного слоя. Одним из перспективных способов повышения эксплуатационной надежности деталей из конструкционных материалов является изменение свойств поверхности за счет модифицирования структуры поверхности и нанесения покрытий, в том числе с наноструктурой [1]. Однако при реализации любых технологий модифицирования или нанесения покрытий возникают значительные затруднения, связанные с наличием на поверхности оксидов, слабо связанных с основой и влияющих на качество формируемого покрытия и модифицированного слоя. В связи с этим качество формирования покрытий и модифицированного поверхностного слоя часто определяется эффективностью способа подготовки исходной поверхности.

В настоящее время наряду с традиционными гальваническими процессами создания покрытий на деталях из конструкционных материалов все чаще применяют экологически чистые методы вакуумной ионно-плазменной обработки (ВИПО). Задача обеспечения качества формируемого модифицированного слоя или покрытия при ВИПО носит комплексный характер. Пути ее решения зависят от структурного состояния исходного материала, способа и вида финишной обработки поверхности детали, технологических возможностей применяемого оборудования и эффективности воздействия плазмы на поверхность детали на всех технологических этапах обработки. Кроме того, качество обработки поверхно-

сти зависит от методов контроля технологических этапов и их приборного обеспечения [2, 3].

Применение ВИПО характеризуется большими технологическими возможностями по изменению физико-химических и механических свойств поверхности за счет получения оптимальной структуры, фазового состава и степени легирования фаз. Прежде всего изменение поверхностной структуры и свойств достигается при диффузионном модифицировании газовой и металлической плазмой (рис. 1). При этом могут формироваться структуры различных видов согласно диаграммам состояния материал подложки — диффузионно-насыщающая газовая или металлическая плазма: как градиентные структуры, состоящие из твердых растворов и химических соединений, так и интерметаллидные соединения [4]. Наилучшее сочетание свойств при диффузионном модифицировании наблюдается в том случае, когда формирование

структуры поверхностного слоя начинается с образования твердых растворов, плавно переходящих в химические соединения. Так, при ионном азотировании титанового сплава ВТ6 наилучшее сочетание поверхностной твердости с глубиной диффузионного слоя и триботехническими свойствами наблюдается при формировании фазового состава модифицированного слоя в соответствии с диаграммой состояния Ti—N: вначале происходит образование твердого раствора внедрения азота в α - и β -фазах титана, затем протекает инициированное азотом $\beta \rightarrow \alpha$ -превращение с образованием в конечном итоге на поверхности слоя нитридов состава от Ti_2N до TiN (рис. 2) [5, 6].

Изменение свойств поверхности при ВИПО может быть достигнуто за счет нанесения покрытия из чистого металла и его нитридных, карбидных и оксидных соединений. При этом могут формироваться как монослойные покрытия, так и многослойные много-

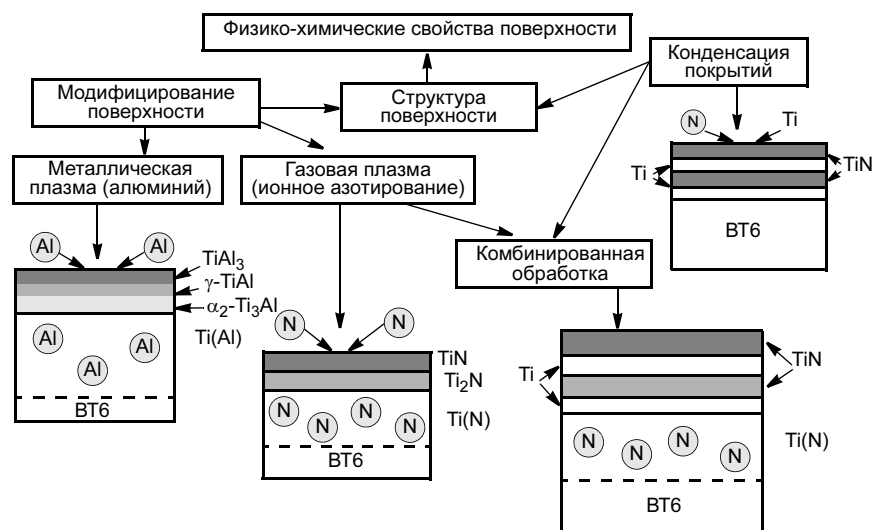


Рис. 1. Схема формирования структуры и комплекса свойств поверхности конструкционных материалов при ВИПО (на примере деталей из титанового сплава Ti—6Al—4V)

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ 06-04-90812 Мол_а.

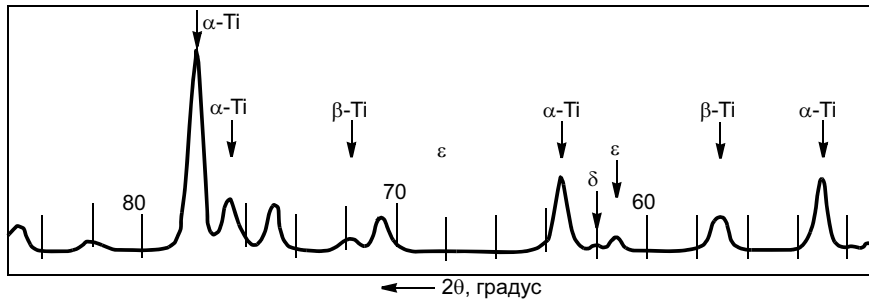


Рис. 2. Участок дифрактограммы поверхности сплава ВТ6 после ионного азотирования ($T = 500\text{--}550\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 30\text{ мин}$)

компонентные с нанометрической структурой в промежуточных и основных слоях. Сочетание диффузионного модифицирования и конденсации покрытия в едином технологическом цикле позволяет осуществить комбинированную обработку поверхности с реализацией нового комплекса эксплуатационных свойств [5].

Внедрение вакуумных ионно-плазменных технологий (ВИПТ) началось с разработки коррозионно-износостойких многослойных покрытий системы Ti—Ti₂N—TiN для стандартизованной арматуры соединений трубопроводов из стали ЭИ 961. Результаты испытаний разработанной композиции показали ее высокую работоспособность в ниппельных соединениях трубопроводов. При этом установлено, что уровень реализуемых свойств покрытия в значительной степени зависит от технологии ее формирования. Выявленные в ходе исследований закономерности изменения фазового состава и структуры покрытий от энергетических параметров плазменного потока позволили оптимизировать технологический процесс формирования многослойного покрытия, особенно на этапе очистки и активации поверхности и нанесения демпфирующего (промежуточного) и твердого (основного) слоев. Установленное соотношение этих слоев (1—2) обусловило уменьшение количества микропор до 5 пор на 1 см², что позволило обеспечить его высокую коррозионную стойкость. Результатом технологических исследований процесса ВИПО являются разработанные технологические рекомендации ТР 1.4.1580—86, ТР 1.8.508.87.228—88, которые явились базовыми при разработке директивных технологических процессов. В частности, разработаны процессы нанесения многослойных покрытий на основе композиции нитрида титана, комбинированное поверхностное уп-

рочнение, процесс низкотемпературного формирования покрытия, а также процесс удаления и восстановления покрытий. Для применения этих документов разработаны также методы контроля качества формирующихся покрытий, особенно состояния поверхности на финишном этапе формообразующих технологических процессов. Так, для анализа состояния поверхности на этапе очистки и ее активации предложен метод оценки энергетического состояния поверхности. По изменению значения поверхностного потенциала, измеренного методом контактной разности потенциалов, удалось количественно оценить степень загрязнения и очистки поверхности. Разработан и изготовлен прибор, а также методики измерения поверхностного потенциала при формировании ионно-вакуумных покрытий и диффузионных модифицированных слоев. На базе рентгеновского бездифракционного флуоресцентного анализатора разработан метод контроля толщины покрытий,

позволяющий быстро и с точностью до ±0,4 мкм измерять толщину покрытий на деталях ниппельных соединений, а также метод измерения остаточных макронапряжений [7].

Дальнейшие работы по развитию ВИПТ привели к созданию комплексной системы обеспечения воспроизводимости и качества поверхностных структур и свойств конструкционных материалов методом ВИПО (рис. 3). Основой этой системы является вакуумное оборудование с встраиваемыми блоками ионного травления, активирующего нагрева, источниками активной металлической плазмы и источником импульсного опорного напряжения, которое позволяет производить поверхностную обработку всех конструкционных материалов, применяемых в машиностроении. При этом реализуется больше технологических возможностей, связанных с получением диффузионных модифицированных слоев, формированием многокомпонентных, многослойных покрытий с градиентной и нанометрической структурой, а также осуществлением комбинированной обработки в едином технологическом цикле. Комплексная система предусматривает также моделирование технологических процессов, разработку методов и приборов контроля качества, а также осуществление аттестации рабочего объема вакуумной камеры и сертификации технологических процессов. Основным технологическим этапом, обеспечивающим качество формирования модифицированных слоев и покрытий,

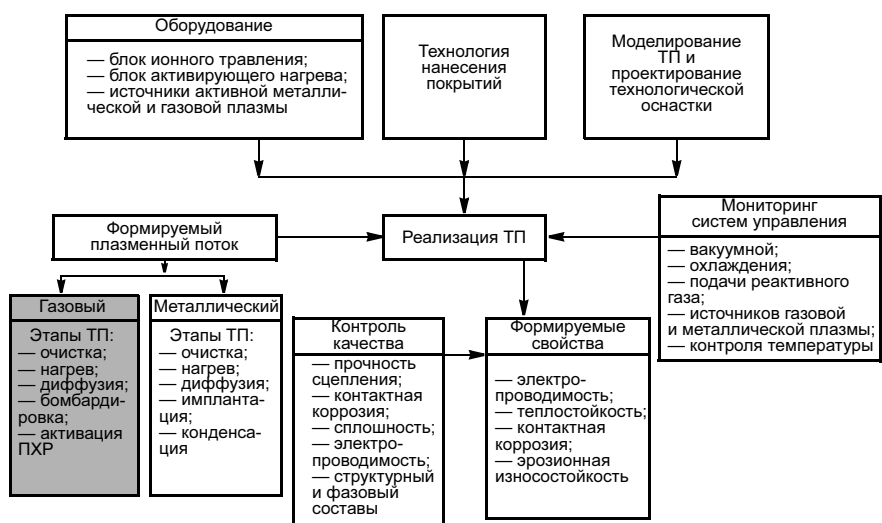


Рис. 3. Комплексная система получения заданных свойств поверхности титановых сплавов при ВИПО

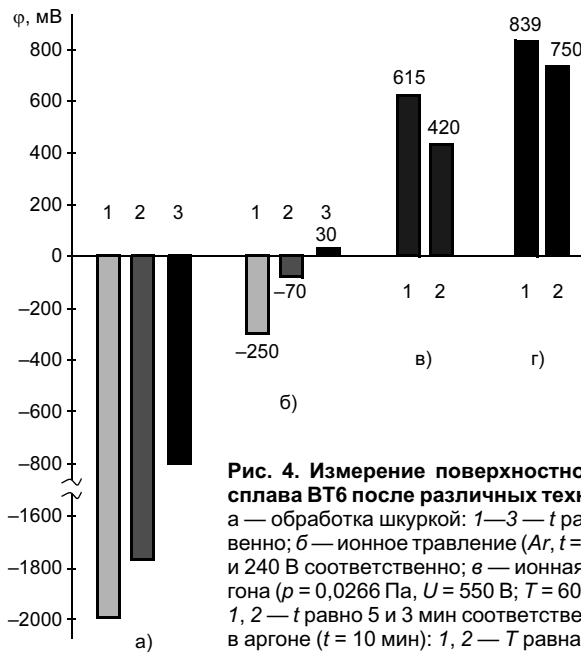


Рис. 4. Измерение поверхностного потенциала титанового сплава VT6 после различных технологических воздействий: а — обработка шкуркой: 1—3 — t равно 0, 10 и 30 мин соответственно; б — ионное травление (Ar , $t = 5$ мин): 1—3 — U равно 0, 100 и 240 В соответственно; в — ионная бомбардировка плазмой аргона ($p = 0,0266$ Па, $U = 550$ В; $T = 600$ °C; нагрев в течение 3 мин): 1, 2 — t равно 5 и 3 мин соответственно; г — электронный нагрев в аргоне ($t = 10$ мин): 1, 2 — T равна 550 и 500 °C соответственно

является ионное травление исходной поверхности деталей ускоренной квазинейтральной газовой плазмой. При этом достигается полное удаление с поверхности загрязнений и оксидов и ее активация. В качестве источника ускоренной газовой плазмы применяют модуль "Плагус", образующий ионный газовый поток энергии 200 эВ.

Об эффективности ионного травления можно судить по изменению величины поверхностного потенциала ϕ (мВ). Так, у титанового сплава VT6 в результате ионного травления почти полностью восстанавливается поверхностный потенциал после вакуумного отжига (рис. 4). Таким образом, критерием активности обрабатываемой поверхности может являться энергетическая характеристика поверхностного потенциала, которая в результате ионного травления изменяется от минусового значения до плюсового.

Результаты исследований показали, что качество и воспроизводимость технологических операций при ВИПО достигаются, когда вакуумная установка имеет модуль ионного травления и активации поверхности, источники активной металлической и газовой плазмы. Существующие серийные установки, как правило, имеют один или несколько источников активной плазмы металла, используемой на всех этапах технологического процесса, включая очистку и активацию поверхности. Такой подход к фор-

мированию покрытий оправдан при их нанесении на инструмент средних и крупных размеров. Для деталей машиностроения, особенно сложных геометрических форм, и деталей с высокой твердостью (низкая температура отпуска) более целесообразно применять газовые источники плазмы, обеспечивающие очистку и активацию поверхности при низких температурах (200—250 °C) без деформации исходной поверхности. Отсутствие на серийных установках дополнительных блоков газовой плазмы приводит к снижению качества покрытия. Однако в случае установки всего комплекса дополнительного оборудования технологические возможности установки резко снижаются: ограничивается возможность формирования многокомпонентных покрытий; возникают трудности в обеспечении сплошности и структурной однородности обрабатываемых поверхностей.



Рис. 5. Установка "Радуга" для ВИПО конструкционных материалов

В связи с этим появилась техническая необходимость создания общего технологического модуля, включающего блоки ионного травления, нагрева и активации поверхности и два источника активной металлической плазмы. Особенностью данных установок "Радуга" (рис. 5) является наличие боковых технологических модулей, позволяющих изменять конфигурацию плазменных потоков в рабочем объеме камеры. Конструкция камеры и технологические модули позволяют обрабатывать детали из металлических материалов и неметаллов, включая детали основного производства, штамповую оснастку и инструмент.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ионно-вакуумные технологии создания градиентных, нанометрических поверхностных структур в конструкционных материалах* / А. А. Ильин, Л. М. Петров, С. Я. Бецофен, В. С. Спектор // Оборудование и технологии для производства компонентов твердотельной электроники и наноматериалов. М.: МИСиС, 2005. С. 251—259.
2. *Исследование влияния текстуры и гетерогенности состава на измерение остаточных напряжений в ионно-плазменных покрытиях* / С. Я. Бецофен, Л. М. Петров, А. А. Ильин и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2004. № 1. С. 39—45.
3. *Рентгеновские методы исследования газонасыщенных слоев в титановых сплавах* / С. Я. Бецофен, Л. М. Петров, С. М. Сарычев, И. О. Банных // Тi—2005 в СНГ. Киев: РИО ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2005. С. 240—243.
4. *Структурные аспекты ионного азотирования титановых сплавов* / А. А. Ильин, С. Я. Бецофен, С. В. Скворцова и др. // Металлы. 2002. № 3. С. 6—15.
5. *Исследование влияния различных видов обработки поверхности на эффективность азотирования Ti сплавов* / Л. М. Петров, Т. В. Федорова, В. С. Спектор и др. // Сб. науч. тр. МАТИ им. К. Э. Циолковского. М.: Издательский центр "МАТИ", 2005. Вып. 9 (81). С. 17—22.
6. *Ионно-вакуумное азотирование как способ повышения триботехнических характеристик титановых сплавов* / С. В. Скворцова, А. А. Ильин, Л. М. Петров и др. // Тi—2005 в СНГ. Киев: РИО ИМФ им. Г. В. Курдюмова НАН Украины, 2005. С. 231—236.
7. *Ильин А. А., Спектор В. С., Петров Л. М.* Комплексная оценка обеспечения работоспособности титановых сплавов методами вакуумной, ионно-плазменной обработки // Авиационная промышленность. 2005. № 2. С. 27—32.

А. А. ЛОЗОВАН, д-р техн. наук, Н. Н. ЩИТОВ, аспирант
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Оптимизация процесса разработки вакуумных наногradientных покрытий

Цель данной работы — оптимизация процесса разработки вакуумных покрытий сложного состава и структуры, предназначенных для радикального улучшения функциональных характеристик различных изделий. Изменение состава и структуры данных покрытий характеризуется градиентами, лежащими в нанометровом диапазоне — наногradientные покрытия. В идеале можно говорить о покрытиях с атомно-резкими границами между различными слоями, диффузионное размытие которых определяется особенностями технологического процесса. Толщина же отдельного слоя вакуумного покрытия составляет от десятков до сотен нанометров. Критически важными для функциональных характеристик покрытий являются обе характерные величины — толщина отдельного слоя и размер переходной области, где градиент отличен от нуля.

Процесс разработки подобных покрытий состоит из нескольких этапов, для каждого из которых должна быть выбрана своя оптимальная стратегия. Во-первых, речь идет об оптимизации состава и структуры самого покрытия применительно к его функциональному назначению. Во-вторых, требуется выбрать технологический процесс нанесения такого покрытия, обеспечивающий заданные геометрические параметры в плане толщины и градиентов [1]. Оптимальная стратегия этого этапа предполагает минимизацию объема предварительных исследований зависимостей свойств получаемых покрытий от параметров этого процесса. Наконец, в-третьих, как правило, требуется корректировка как состава и структуры самого покрытия, так и технологических режимов по результатам функциональных испытаний. Этот этап можно оптимизировать как с точки зрения объема исследований, так и правдивости определения лучших параметров покрытия.

Реализация этих стратегий подразумевает использование различных математических подходов и физических допущений, а также экспериментальных методик. На первом этапе речь идет о постановке задачи оптимального управления на классе решений прямой задачи функционального назначения [2]. Например, при разработке теплозащитного покрытия прямая задача состоит в решении уравнения теплопроводности в неоднородной среде, а для твердых покрытий режущего инструмента — контактные задачи теории упругости неоднородных сред [3]. Второй этап подразумевает использование теории эксперимента, в частности концепции многофакторного эксперимента, а также современных методик анализа поверхностей. Третий этап предполагает использование теории интегральных преобразований, так как функциональная характеристика покрытия в общем случае может быть записана в виде интеграла по толщине покрытия. При этом вид ядра интегрального преобразования, как правило, неизвестен и вряд ли может быть формализован в общем случае. В этой связи выбор оптимальной методики постановки экспериментов на данном этапе представляется исключительно важным [4].

Как уже отмечено, на первом этапе рассматривается возможность оптимального параметрического управления любыми свойствами твердого тела путем искусственного создания сложных упорядоченных структур, минимизирующих соответствующие критерии качества. В отличие от свободной энергии, минимум которой соответствует равновесному состоянию, эти критерии задаются разработчиком на множестве управляющих переменных — параметров, определяющих функциональные свойства разрабатываемой структуры — модуля упругости, коэффициента теплопроводности, плотности и т. д. Таким образом, вместо решения прямых задач, т. е. задач о предсказании свойств того или иного вида покрытия (структуры) при известных законах изменения управляющих переменных, предлагается решать обратную задачу, т. е. определять законы изменения параметров, обеспечивающих получение требуемых свойств покрытия.

Следует сразу же оговориться, что корректная постановка задачи оптимизации подразумевает постановку прямой задачи, так как оптимальное управление строится на классе решений прямой задачи. Правильная постановка прямой задачи означает корректное описание поведения разрабатываемого покрытия уравнениями состояния применительно к конкретной прикладной задаче — например, изготовлению износостойкого покрытия для режущего инструмента. Это означает, в частности, и адекватное задание граничных (для статических задач) и начальных (для динамических) условий в конкретной схеме применения. При этом сами управляющие переменные — параметры — считаются неизвестными функциями координат (и возможно времени), экстремальные значения которых лежат в диапазоне допустимых значений. Критерием качества, определение экстремума которого и составляет суть задачи оптимизации, может быть выбрана любая величина, связанная с расчетными характеристиками покрытия, например, стоимость покрытий, обеспечивающих обработку определенного числа деталей. Тем самым оптимизационная задача подразумевает как более широкую постановку вопроса о свойствах разрабатываемого материала (покрытия), так и одновременно "узкую специализацию" покрытий применительно к предполагаемой области использования. Не существует, например, универсальных износостойких покрытий.

Решение прямой задачи для среды со сложным законом изменения параметров по координатам требует наличия отработанных программ и чрезвычайно больших затрат машинного времени [5]. Кроме того, аналитические решения могут быть получены только для очень ограниченного класса контактных задач. Авторы работы [3] справедливо подчеркивают, что "особое значение в настоящее время имеют контактные задачи для неоднородных сред, так как непрерывное изменение механических свойств по одной из координат характерно для многих тел, что связано с условиями их создания и эксплуатации. ...Преимущества, связанные с увеличением

срока эксплуатации изделий, стимулируют процесс создания функционально-градиентных покрытий и функционально-градиентных соединений, несмотря на все возрастающую сложность технологии получения таких материалов".

Так как сами по себе управляющие переменные являются функциями химического состава и кристаллической структуры (монокристалл, поликристалл, аморфная фаза), то фактически создание оптимального покрытия подразумевает создание переменного по составу и/или структуре материала. При этом одному и тому же оптимальному закону могут соответствовать покрытия разного состава и структуры. Это означает возможность оптимизации по цене и простоте технологического процесса. С другой стороны, изменение состава влечет за собой изменение не только данного параметра, но и многих других, что делает данную структуру перспективной для применения совсем в других областях. Это означает, что отработка технологического процесса создания упорядоченных структур определенного состава позволит при изменении геометрических параметров оптимизировать покрытия для совершенно разных применений. При этом может рассматриваться целый набор критериев качества — целевых функций, с помощью которых оптимизируется функциональное назначение покрытия, как это делается, например, при оптимизации шлифования [6].

Для решения оптимизационных задач в тех случаях, когда критерии качества (целевые функции) выражаются в виде интегралов — интегральных характеристик, следует использовать теорию оптимального управления, так как в ней снимается ограничение на непрерывность функций, что дает возможность рассматривать кусочно-постоянные решения. В отличие от классических задач управления, в которых состояние динамической (механической, электрической, химической и т. д.) системы характеризуется переменными состояниями, зависящими от времени, "переменные состояния" покрытия зависят от координат(ы). Заметим, что в классических задачах управления в качестве управляющих переменных выступают зачастую производные по времени — в случае покрытий это будут градиенты. Используя принцип максимума Понтрягина, можно и без решения конкретной задачи сделать некоторые общие выводы касательно законов изменения параметров оптимальных структур. Известно, что, если управляющая переменная входит в гамильтонову функцию данной задачи линейно: $H(y_i, p_i, u) = h(y_i, p_i) + u g(y_i, p_i)$, то оптимальное управление реализуется кусочно-постоянной функцией:

$$u(x) = \begin{cases} u_{\max}, & g(y_i(x), p_i(x)) > 0 \\ u_{\min}, & g(y_i(x), p_i(x)) < 0, \end{cases}$$

где u_{\max} , u_{\min} — соответственно максимальное и минимальное допустимые значения управляющей переменной. Требование линейности не сильно сужает круг задач, так как управляющая переменная, как правило, входит линейно в уравнение состояния — например, коэффициенты теплопроводности и диффузии в соответствующие уравнения, электропроводность, диэлектрическая и магнитная постоянные и т. д. Таким образом, гамильтонова функция максимальна, а критерий качества, соответственно, минимален, когда управляющая переменная принимает максимальное значение, если функ-

ция $g(y_i, p_i)$ положительна, и минимальное, если $g(y_i, p_i)$ отрицательна. Если параметр, от которого зависят переменные состояния, — координата, то оптимальное управление реализуется многослойной (по этой координате) структурой. Число слоев определяется количеством изменений знака функции $g(y_i, p_i)$. Если $g(x)$ периодически меняет знак, то оптимальное управление — периодическая кусочно-постоянная функция.

В работе [2] рассмотрена задача оптимального управления на примере одномерного уравнения Гельмгольца. Уравнение возникает при разделении переменных в уравнениях теплопроводности, диффузии, описывает стационарное распределение электромагнитного поля в среде при наложении внешнего поля; распределение амплитуды акустической волны; стационарное решение уравнения Шредингера для частицы в поле периодического потенциала и т. д. Показано, что для получения периодического решения, максимально близкого к наперед заданному, следует осуществить параметрическое управление свойствами среды путем периодического изменения управляющего параметра в соответствии с заданным законом. Этот факт отражает ни что иное как эффект Брэгга при рассеянии плоской волны на одномерной периодической структуре. Тогда совпадение периода структуры с половиной волны представляет собой условие Брэгга—Вульфа в первом порядке и нормальном падении волны. Тем не менее, вывод об оптимальности именно кусочно-постоянной функции априори далеко не очевиден. Более того, решение "прямой задачи", а именно самого уравнения Гельмгольца в среде с кусочно-постоянным изменением показателя преломления, требует значительно больших усилий и применения численных методов.

Из проведенного рассмотрения сделаны следующие выводы:

- многослойные структуры являются классом материалов, оптимизирующих различные свойства твердых тел, с точки зрения функционального назначения, аргументом заданного разработчиком;
- теория оптимального управления позволяет при правильном задании критерия качества получать кусочно-постоянные решения, соответствующие упомянутому выше априорному заданию;
- оптимальное управление осуществляется тем лучше, чем сильнее различаются значения управляющей переменной в сопряженных слоях структуры;
- для реализации оптимального управления требуется точное соответствие толщин слоев заданным значениям и минимальные величины переходных областей — наноградиентные покрытия.

При повышении размерности, т. е. переходе в задачи оптимального управления от функций, зависящих от одной координаты, к функциям, зависящим от двух и трех координат, естественно ожидать кусочно-постоянных решений, представляющих собой двух- и трехмерные периодические структуры с резким изменением значения управляющей функции при изменении знака соответствующего множителя в гамильтоновой функции. Применительно к покрытиям можно говорить о том, что переход к трехмерным задачам соответствует переходу от многослойных покрытий к нанокomпозитным. Таким образом, можно сказать, что все композиционные материалы реа-

лизуют оптимальное параметрическое управление соответствующими свойствами материалов.

Тем не менее, далеко не очевидно, что для данной задачи нужная функция меняет знак. Если при решении задачи о падении световой волны на покрытие сама вынуждающая функция (амплитуда падающей волны) — периодическая функция, меняющая знак, то в общем случае это далеко не так. Например, при попытке постановки задачи оптимального управления на классе решений уравнения теплопроводности (максимальная теплозащита) невозможно получить решения помимо тривиальных, т. е. максимальной тепловое сопротивление по всей глубине покрытия, без введения неких дополнительных ограничений. В качестве такого ограничения может выступать, например, значение среднего по толщине покрытия значения управляющего параметра. Если максимальность температурного сопротивления подразумевает минимальность коэффициента теплопроводности — вакуум, то в реальности необходимы некие стенки для создания между ними вакуума. Проще всего понять идеологию создания многослойных покрытий при сравнении тепловых сопротивлений при заданной толщине $2H$ и возможности выбора между коэффициентами теплопроводности k_1 и k_2 при том, что среднее значение коэффициента теплопроводности по толщине должно быть $1/2(k_1 + k_2)$. Тогда тепловое сопротивление однослойного покрытия, соответствующего среднему коэффициенту теплопроводности, $\langle R \rangle = \frac{4H}{k_1 + k_2}$. Если же покрытие состоит

и двух слоев равной толщины с экстремальными значениями коэффициента теплопроводности, то его тепловое сопротивление $R_\Sigma = R_1 + R_2 = \frac{H}{k_1} + \frac{H}{k_2} = \frac{H(k_1 + k_2)}{k_1 k_2}$, а разность сопротивлений

$$\Delta R = R_\Sigma - \langle R \rangle = \frac{H[(k_1 + k_2)^2 - 4k_1 k_2]}{k_1 k_2 (k_1 + k_2)} = \frac{H(k_1 - k_2)^2}{k_1 k_2 (k_1 + k_2)}$$

Видно, что тепловое сопротивление двухслойного покрытия по сравнению с однослойным тем больше, чем больше разность между коэффициентами теплопроводности, причем $R_\Sigma \rightarrow \infty$ при $k_{1,2} \rightarrow 0$, а $\langle R \rangle \rightarrow \frac{4H}{k_{2,1}}$ при

$k_{1,2} \rightarrow 0$. Таким образом, правильная постановка обратной задачи является весьма непростой.

Задачи оптимизации 2-го и 3-го этапов могут быть успешно решены с помощью создания многослойных структур. Это следствие еще одной важной особенности таких структур, радикально отличающей их от однородных материалов, — информативности многослойных структур. Простейший вид информации — набор чисел, определяющий толщины слоев. Такая информация легко может быть считана при исследовании поперечных сечений (например, сколов или косых шлифов) многослойных структур соответствующими методами [7]. Кроме того, поперечные сечения несут в себе информацию о процессе выращивания таких структур, влиянии изменения тех или иных технологических параметров на скорость роста, химический состав и кристаллическое совершенство растущего слоя. В самом деле, получаемое покрытие представляет собой "запись" изменения во времени со-

става (энергии, плотности) осаждающихся на поверхность частиц — атомов, ионов, которую можно использовать для определения оптимальных технологических параметров путем искусственного введения периодической по времени неоднородности в растущий слой (метод "меток времени"). Метод позволяет точно определить зависимость получаемых функциональных параметров от технологических, так как позволяет "привязать" свойства слоя к значениям технологических параметров в данный момент времени, исключая влияние всевозможных дрейфующих во времени переходных процессов — изменения остаточного давления и т. д. Это обстоятельство позволяет с помощью таких структур неизмеримо ускорить оптимизацию процесса выращивания как многослойных, так и однородных материалов.

В любом случае для правильного выбора параметров и закона их изменения по координате необходимо провести предварительные эксперименты в соответствии с излагаемой далее методикой [5]. Пусть целью исследования является определение закона изменения конкретного параметра (предела текучести, коэффициента преломления и т. д., являющегося функцией состава и структуры) по глубине покрытия, обеспечивающего экстремальное значение некоторой интегральной характеристики (ИХ) покрытия — например, коррозионно- или износостойкости. Такая характеристика, как правило, выражается числом, которое и определяет степень достижения поставленной цели. Если обозначить это число буквой H , а закон изменения параметра по координате x функцией $f(x)$, то в простейшем случае можно считать H результатом воздействия некоторого линейного интегрального оператора с ядром $K(x)$ на функцию

$$f(x): H = \int_0^L K(x)f(x)dx \text{ (такие характеристики, как микротвер-$$

дость, в отличие от износостойкости можно отнести к интегральным лишь с некоторыми оговорками — можно говорить о том, что такие величины становятся постоянными, начиная с некоторой толщины $K(x) = 0, x \geq x_0$).

Диапазон изменения $f(x)$ ограничен и может быть выражен в произвольных единицах. Вид ядра неизвестен, однако ясно, что если $K(x)$ не меняет знак в интервале $[0, L]$, то экстремальное значение H достигается, если $f(x)$ во всем интервале имеет экстремальное допустимое значение — максимальное, в случае, когда требуется максимизировать H , а $K(x)$ всюду положительно, и минимальное, если требуется минимизировать H при также положительном $K(x)$. В случае отрицательного $K(x)$ все с точностью до наоборот. Этот результат тривиален, но именно он обычно неявно и подразумевается при попытках создания покрытия с заданными свойствами. В качестве примера можно привести разработку износостойких покрытий, когда покрытие стремятся сделать максимально твердым по всей глубине. Однако это не так. Это означает, что $K(x)$ все же меняет знак, и в этом случае для получения экстремального значения H требуется такой закон изменения $f(x)$, который соответствовал бы изменению значения $f(x)$ от максимального к минимальному при изменении знака $K(x)$.

Явный вид оператора может быть найден экспериментальным путем, если оператор линеен. В самом деле, если $f(x)$ представляет собой периодическую, кусочно-постоянную функцию, то каждое значение H , со-

ответствующее данной функции кратного L/n периода (n определяется минимальной толщиной отдельного слоя) будет представлять собой коэффициент соответствующего ряда, в который может быть разложено ядро. Процедура совершенно аналогична гармоническому анализу с точностью до замены на секвентный анализ, т. е. анализ кусочно-постоянными периодическими функциями. Итак, пусть задан исходя из некоторых дополнительных соображений интервал разложения $x \in [0, L]$ и получен набор периодических структур с кратно изменяющимся периодом. Тогда любая функция в данном интервале разложима в ряд по секвентным функциям — c_i, s_i (аналоги косинусов и синусов), а коэффициенты Эйлера—Фурье данного ряда — функциональные характеристики подобных структур: H_i для структур, соответствующих "косинусам", и H_i^* для структур, соответствующих "синусам". Тогда неизвестное ядро действительно представимо в виде ряда $K(x) = \frac{1}{2} H_0 + \sum (H_i c_i(x) + H_i^* s_i(x))$. Построив эту функцию, получаем искомое решение, т. е. закон изменения параметра:

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} f_{\max}, & \text{sign } K(x) > 0 \\ f_{\min}, & \text{sign } K(x) < 0 \end{cases} : H = H_{\max};$$

$$\tilde{f}(x) = \begin{cases} f_{\min}, & \text{sign } K(x) > 0 \\ f_{\max}, & \text{sign } K(x) < 0 \end{cases} : H = H_{\min}.$$

Приведем пример возможной разработки антифрикционного покрытия. Постановка прямой задачи при описании трения подразумевает использование уравнения упругих колебаний в качестве одного из уравнений состояния. Параметры оптимизации в данном случае совершенно определены — это скорости продольной и поперечных акустических волн. Тем самым варьированию подлежат не сами модули упругости G и E , но скорости, т. е. $\sqrt{\frac{G}{\rho}}$ для поперечной волны и $\sqrt{\frac{E(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1+2\nu)}}$ для продольной. Наличие плотности в знаменателе существенно изменяет ситуацию с выбором материала. Например, если руководствоваться критерием максимальной разности модулей упругости, то для вольфрама эти модули намного превосходят модули алюминия. Однако скорости упругих волн в алюминии больше, чем в вольфраме, что является следствием значительно большей плотности вольфрама. Тем самым выбор предопределяет использование легких материалов с большими модулями в качестве "условно твердых" слоев и тяжелых материалов с малыми модулями в качестве "условно мягких" слоев. В этом смысле чрезвычайно интересным представляется исследование многослойных структур Al/Pb, у которых продольные скорости составляют соответственно $6,26 \cdot 10^3$ и $2,16 \cdot 10^3$ м/с, а поперечные $3,08 \cdot 10^3$ и $0,7 \cdot 10^3$ м/с, так что глубина модуляции параметра $\eta = \frac{2(P_{\max} - P_{\min})}{P_{\max} + P_{\min}}$ составит для продольной волны порядка 0,97 и для поперечной — 1,26. Таким образом выполнена первая рекомендация максимальной вариации управляющего параметра. И действительно, в рабо-

те [8] описаны подшипники скольжения из алюминий-свинцовых сплавов. Отмечено, что "алюминий-свинцовые сплавы, содержащие более 14 % Pb, по данным отечественных и зарубежных исследований, обладают исключительной задиростойкостью при высоких скоростях и ультратонких слоях смазки".

Однако априори неясно, должно ли быть такое покрытие чисто периодическим и какого периода или же многослойным с переменной толщиной отдельных слоев. Определив с помощью "метода меток времени" оптимальные технологические параметры, при которых воспроизводимо попеременно наносятся слои алюминия и свинца заданной толщины в одном процессе, переходим к третьему этапу. На этом этапе и реализуется вторая из общих рекомендаций — определение закона изменения параметра или же местоположение нулей соответствующей функции, где она меняет знак. Очевидно, что среди всех подобных многослойных покрытий одинаковой суммарной толщины лишь одно должно показать экстремальные значения интегральной характеристики. Проведя описанную выше процедуру получения и исследования периодических структур с кратно уменьшающимся периодом, с помощью обратного преобразования определяем неизвестный закон вариации параметра. Теперь уже можно наносить покрытие, удовлетворяющее всем условиям задачи оптимизации, если, конечно, ядро линейно. В общем случае, вероятно, потребуются проведение некоторых корректирующих экспериментов. Приведенный пример не исчерпывает всех возможных вариантов выбора оптимальной стратегии, однако позволяет лучше "почувствовать" предлагаемую методику.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лозован А. А., Щитов Н. Н. Перспективные ионно-плазменные технологии получения многослойных покрытий и структур // Быстрозакаленные материалы и покрытия. М.: "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. С. 184—192.
2. Щитов Н. Н. Многослойные структуры — материалы с заданными оптимальными свойствами // Быстрозакаленные материалы и покрытия. М.: "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. С. 103—109.
3. Контактные задачи теории упругости для неоднородных сред / С. М. Айзикович, В. М. Александров, А. В. Белоконь и др. М.: Физматлит, 2006. 236 с.
4. Щитов Н. Н. Методика планирования экспериментов по созданию покрытий с заданными свойствами // Быстрозакаленные материалы и покрытия. М.: "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2006. С. 155—160.
5. Галкин В. И., Палтиевич А. Р., Преображенский Е. В. Применение математического моделирования при разработке новых процессов производства изделий из волокнистых материалов на металлической основе // Быстрозакаленные материалы и покрытия. М.: "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2006. С. 79—84.
6. Солер Я. И., Казимиров Д. Ю. Оптимизация процесса шлифования плоских деталей с учетом их назначения // Технология машиностроения. 2006. № 12. С. 16—20.
7. Комплексные исследования модифицированных слоев и покрытий / С. Е. Еремин, В. В. Сохорева, И. Б. Степанов, И. А. Шулепов // Быстрозакаленные материалы и покрытия. М.: "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2006. С. 141—150.
8. Иванайский А. В. Свойства литых антифрикционных алюминий-свинцовых сплавов // Технология машиностроения. 2000. № 2. С. 6—8.

О. А. БАРАБАНОВА, д-р техн. наук, В. И. МОГОРЫЧНЫЙ, канд. техн. наук,
В. А. ПОЛУНИН, аспирант
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Повышение качества теплообменной техники для криогенных систем

Теплообменники являются одним из важных компонентов любой криогенной системы охлаждения (или ожигения). В отличие от своих аналогов, применяемых в большинстве других областей, криогенные теплообменники должны обладать высокой эффективностью. Технические характеристики рефрижераторов, ожигителей и устройств разделения газов очень сильно зависят от эффективности используемых в них теплообменных аппаратов. Действительно, если эффективность теплообменников окажется ниже некоторого критического значения, большинство криогенных систем станут неработоспособными. Кроме того, сравнительно низкие значения реально достижимого КПД и, как результат, большие энергетические затраты при выработке холода делают низкотемпературные и криогенные системы чувствительными к применению более эффективного теплообменного оборудования.

Кроме высокой эффективности криогенные теплообменники также должны обладать высокой компактностью, т. е. в них в малом объеме должна содержаться большая теплообменная поверхность. Это позволяет создавать теплообменники с хорошими массогабаритными показателями.

Необходимость достижения высокой эффективности и компактности одновременно в одном устройстве привела к тому, что Макмахон и др. в 1950 г. предложили конструкцию теплообменника [1, 2], которая получила название матричного. Матричный теплообменник (МТ) представляет собой многослойный пакет чередующихся перфорированных пластин из материала с высокой теплопроводностью и дистанционных проставок (рис. 1). Отверстия в проставках образуют каналы для теплоносителей. Теплоносители проходят по соседним каналам в направлении, перпендикулярном плоскости перфорированных пластин. Теплообмен в матричном теплообменнике осуществляется в процессе передачи теплоты перфорированной пластиной как элементом оребрения.

Отличительной особенностью таких теплообменных аппаратов является то, что возможность их проектирования и промышленного освоения определяется уровнем разработки технологии производства этих аппаратов. Технология должна обеспечить герметичное соединение большого числа деталей сложного профиля из высокотеплопроводных сплавов (алюминиевых, медных) и гарантировать теплоизолирующий эффект в направлении движения потоков теплоносителей, что позволяет повысить тепловую эффективность теплообменных систем.

Таким образом, стенки матричного теплообменника представляют собой слоистый композиционный материал (КМ), состоящий из чередующихся слоев металл — теплоизоляционный слой, материал, обладающий различной теплопроводностью в двух взаимно перпендикулярных направлениях (ортогонально анизотропный КМ).

Технология изготовления МТ находится в стадии разработки и связана с поиском наиболее рациональных ре-

шений. Разработки направлены как на совершенствование связующих материалов, отвечающих требованиям прочности, герметичности и долговечности конструкции, так и на освоение новых технологических процессов, позволяющих формировать МТ с заданной сложной структурой каналов.

Анализ отечественной и зарубежной литературы показал, что успехи и неудачи в совершенствовании МТ напрямую зависят от применяемых способов соединения пластин, которые можно разделить, как правило, на три категории [1, 2]:

- разборный монтаж с применением стяжных элементов;
- склеивание металлопластиковых МТ;
- пайка и диффузионная сварка цельнометаллических МТ.

В первых матричных теплообменных аппаратах, разработанных Макмахоном и его сотрудниками [1, 2], серия перфорированных алюминиевых пластин разделялась тонкими штампованными неопревыми прокладками, которые также служили для разделения потоков жидкости. Весь пакет вместе с литыми коллекторами на обоих его концах скреплялся стальными стяжными болтами. Неопревые прокладки практически исключали аксиальную проводимость, а также обеспечивали газонепроницаемость теплообменника даже при температурах сжиженного воздуха. Данная конструкция была предельно простой и ремонтпригодной.

Матричный теплообменник, который разработал Гарвин [1, 2] шестнадцатью годами позже Макмахона, содер-

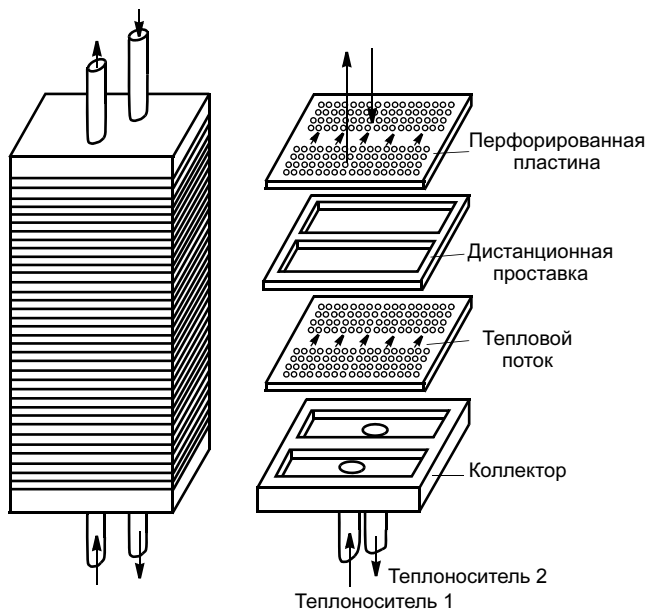


Рис. 1. Конструкция матричного теплообменного аппарата

жал несколько новых черт. Гарвин предложил цилиндрическую геометрию аппарата: он имел кожух в виде тонкостенной трубы, благодаря которой исключались протечки газа во внешнюю среду. Гарвин также предложил применять упругие элементы на обоих концах аппарата для компенсации дифференциального смещения сердцевин теплообменника и поддерживающих его конструкций, возникающего при охлаждении.

Несмотря на очевидные преимущества — простоту сборки и ремонта, возможность повторного использования, низкую себестоимость — теплообменные аппараты со съёмными эластомерными (т. е. из неопрена и нейлона) прокладками были не совсем удачными. Во время работы таких аппаратов при низких температурах, особенно после повторных термических циклов, были выявлены проблемы с герметизацией, что связано со склонностью эластомерных прокладок к затвердеванию при низких температурах и разрушению при циклических тепловых нагрузках. Это привело к применению прокладок из эпоксидных смол и неэластомерных полимеров, с помощью которых можно скреплять перфорированные пластины и проволоочные сетки. Теплообменный аппарат, разработанный Вонком [1, 2], был сделан в виде слоеного пакета из медных проволоочных сеток и прорезиненной бумаги. Пакет закрепляли в специальной оправке и вулканизировали под нагрузкой при определенной температуре. Такой теплообменник применяли в гелиевом ожижителе на основе цикла Стирлинга, который выпускала фирма Philips (Голландия).

Программа по развитию гелиевых ожижителей, осуществлявшаяся компанией General Electric Corporation (США), привела к совершенствованию матричных теплообменных аппаратов, состоящих из перфорированных алюминиевых пластин и пластиковых прокладок. Точные составы используемых смол и пластмасс не были опубликованы в открытой литературе.

Анашкин и др. [1, 2] обнаружили, что для соединения МТ наиболее подходят эпоксидные компаунды на основе силикона типа ВТ-200. Применение других составов, предложенных российскими исследователями, таких как смола ИП614Т и отвердитель ИП5-139Т и эпоксидный клей холодного отвердевания на основе смолы ЭДА-20, нашло отражение в работах Заблоцкой [1, 2]. Мацуда рекомендует для соединения алюминиевых пластин и прокладок Каптона (Дюпона) использовать листы компаунда AF163 производства фирмы "ЗМ" (США) [1, 2]. Этот процесс требует специальной оснастки и мастерства — необходимы специальные приспособления для резки листов компаунда и сборки матриц и их вулканизации при определенных температуре и давлении.

Пластиковые прокладки и технология склеивания пластин смолами дали жизнь цельнометаллической конструкции теплообменных аппаратов, впервые запатентованные Флемингом в 1967 г. [1, 2]. Эти теплообменники состоят из медных (коэффициент теплопроводности $k = 400 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$) перфорированных пластин и прокладок из коррозионно-стойкой стали ($k = 12 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), скрепленных между собой с помощью пайки или диффузионной сварки. Цельнометаллические матричные теплообменные аппараты имеют определенные преимущества перед клеевыми предшественниками: выше прочность соединения; меньше проблем с обеспечением надежного герметичного разделения каналов; исключено затекание клея в каналы теплообменника; отсутствие пробле-

мы старения клея, ограничивающей ресурс работы теплообменника; менее вредное производство.

В общем случае по своим тепловым характеристикам цельнометаллические теплообменники уступают металлопластиковым, что объясняется большим коэффициентом теплопроводности прокладок из коррозионно-стойкой стали, чем у пластиковых. В клеевых теплообменных аппаратах можно использовать алюминиевые пластины, в то время как в цельнометаллических теплообменниках применимы только медные, что делает аппарат значительно тяжелее и дороже.

Цельнометаллические матричные теплообменные аппараты были широко изучены в СССР, особенно Одесским технологическим институтом холодильной промышленности в сотрудничестве с НПО "Кислородмаш" и МВТУ им. Н. Э. Баумана совместно с НИИ химического машиностроения.

Соединенные диффузионной сваркой теплообменные аппараты были выпущены корпорацией Hitachi (Япония) для применения в цикле Клода. В этой установке размер матричного теплообменного аппарата в 4 раза меньше, чем замененный им алюминиевый пластинчатый-ребристый теплообменник.

В разработках Одесского технологического института холодильной промышленности удачно использовали обычный оловянно-свинцовый припой. Аппараты оставались герметичными при давлении в 2—4 МПа даже после повторяющихся тепловых циклов. Однако часть перфорации оказалась забита припоем. Пайка — простой процесс и не требует дорогого оборудования. Относительно низкая температура пайки исключает искажения пластин и прокладок, что имеет место при диффузионной сварке МТА. Основной недостаток — высокая теплопроводность такого теплообменника. Кроме того, количество припоя при пайке также весьма критично. Если оно слишком мало, то герметичность будет недостаточной, если слишком велико — излишки припоя перекроют перфорацию.

Таким образом, механическое крепление и склеивание не позволяют получить прочное соединение материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Соединения, изготовленные пайкой и диффузионной сваркой, обладают высокой механической прочностью, однако в связи с тем, что самый низкий коэффициент теплопроводности металла в несколько раз выше коэффициента теплопроводности любого теплоизоляционного материала, эффективность такого теплообменника ниже разборного и клеевого. Проблема достижения требуемой совокупности механических и тепловых свойств сформировала комплекс технологических и теплофизических требований к свойствам КМ для криогенных систем: пониженные массовые характеристики КМ; материал матрицы — высокотеплопроводный металл; материал прокладки с низкой теплопроводностью (не более $1\text{—}3 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$), должен быть устойчивым против эрозии и коррозии в потоках теплоносителей при гарантированном сроке эксплуатации; стойкость к термостатированию и герметичность в интервале температур $77\text{—}393 \text{ К}$; прочность при избыточном давлении внутри изделий из КМ не ниже 2,5 МПа.

В свете существующих требований к материалам, используемым в различных отраслях промышленности для теплообмена и рассеяния теплоты, КМ — алюминий (медь) — многокомпонентная оксидная система (стекло) представляет несомненный интерес. Сочетание высокой теплопроводности алюминия (меди) с хорошими тепло-

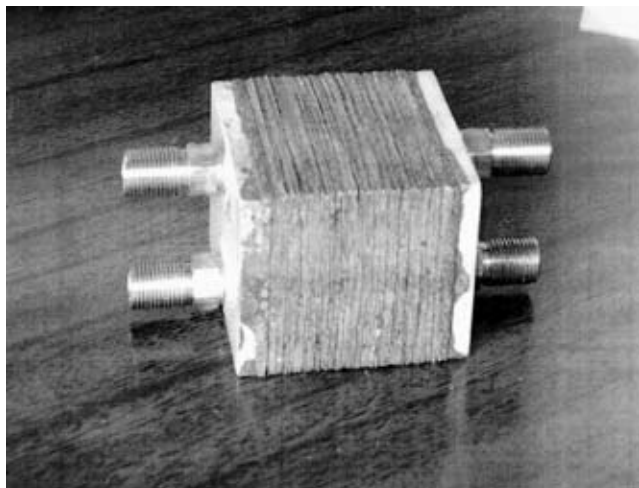


Рис. 2. Матричный теплообменник для дроссельной криогенной системы на температурный уровень 80—120 К, работающей по циклу Линде

изоляционными свойствами стекла наряду с необходимой прочностью и эрозионной устойчивостью к большинству теплоносителей позволяет применять новый КМ в качестве функционального материала, позволяющего управлять тепловым потоком в конструкциях теплообменных аппаратов.

В настоящее время наиболее перспективным технологическим решением является изготовление матричных теплообменников на основе ортогонально анизотропного КМ, в котором плоские слои из высокотеплопроводного металла соединены низкотеплопроводными стеклянными прослойками с помощью диффузионной сварки [3]. Использование в КМ стекла в качестве соединительной и теплоизоляционной прокладки позволяет задавать направление и величину теплового потока и проводить диффузионную сварку на воздухе.

Перспективность применения КМ алюминий (медь) — стекло и изготовление из него теплообменного оборудования определяется большими возможностями производства сложнопрофильных тонкостенных изделий различной топологии; высоким уровнем технико-экономических показателей технологии вследствие простоты ее материально-технического обеспечения (отсутствие вакуумного оборудования и дорогостоящей оснастки), легкости в управлении и контроле на всех этапах технологического цикла.

Преимущество новой технологии состоит в том, что производится одновременное соединение всех элементов конструкции теплообменника, в том числе и коллекторов. При этом важным фактором является то, что диффузионная сварка не приводит к деформации элементов теплообменника, что является гарантией сохранения эффективности, заложенной в процессе проектирования теплообменного аппарата.

На основе нового КМ разработаны и изготовлены матричные теплообменники из алюминия для ряда криогенных систем (рис. 2). На рис. 3 приведены теплообменная пластина (1) и дистанционная проставка (2) матричного теплообменника. Этот теплообменник применяют в дроссельной регенеративной системе, работающей на многокомпонентных рабочих телах.

Новая технология предусматривает применение однотипных, плоских штампованных элементов (матриц),

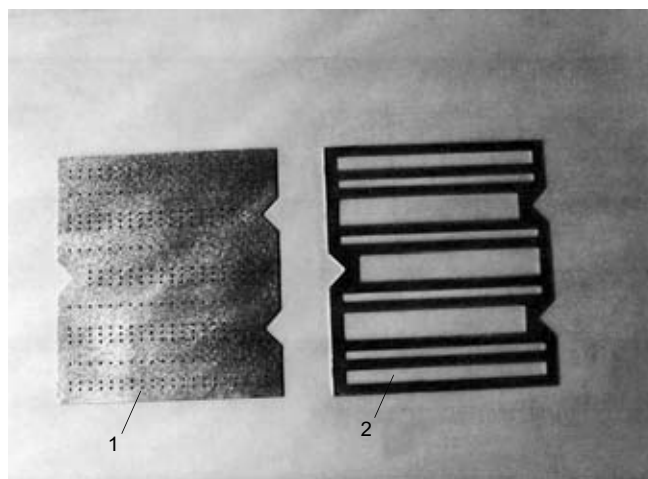


Рис. 3. Теплообменная пластина и дистанционная проставка матричного теплообменника для дроссельной системы на температурный уровень 120 К

соединяемых в единый пакет диффузионной сваркой на воздухе через промежуточную прослойку — многокомпонентную оксидную систему (стекло). Особенности теплообменных аппаратов, изготовленных по новой технологии:

- конструкция — можно изготовить как трубчатые, так и пластинчато-ребристые теплообменные аппараты;

- компактность (удельная поверхность теплообмена) — только эта технология может обеспечить производство теплообменников компактностью до $20\,000\text{ м}^2/\text{м}^3$;

- универсальность — теплообменные аппараты обеспечивают теплообмен двух и более потоков; теплоносители могут быть в газовом, жидкостном и парожидкостном состояниях; теплообмен может сопровождаться фазовыми превращениями (кипением и конденсацией); система каналов может быть противоточной, перекрестной, многоходовой;

- прочность — рабочий диапазон давлений вакуум — 6 МПа в диапазоне рабочих температур 80—450 К;

- эффективность — КПД теплообменника определяется высокой компактностью теплообменной поверхности каналов и малой теплопроводностью вдоль стенок теплообменного аппарата;

- экономичность — технология предусматривает модульное исполнение теплообменных аппаратов, которые при необходимости могут быть собраны в блоки (т. е. легко осуществима унификация).

На основе новой технологии может быть обеспечено производство теплообменников с эффективностью до 94 %, при этом их масса в 2—3 раза ниже, чем у существующих аналогов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Микулин Е. И., Шевич Ю. А. Матричные теплообменные аппараты. М.: Машиностроение, 1983. 110 с.
2. Venkatarathnam G., Sarangi S. Matrix heat exchangers and their application in cryogenic system // *Cryogenic*. 1990. Vol. 30. P. 907—918.
3. Принципы создания композиционных материалов для криогенных теплообменников / О. А. Барабанова, В. А. Могорычнй, В. А. Полуни, С. В. Набатчиков // *Композиционные материалы в промышленности*. Ялта — Киев: УИЦ "Наука, Техника, Технология", 2006. С. 18—19.

А. А. ИЛЬИН, д-р техн. наук, А. М. МАМОНОВ, д-р техн. наук, В. Н. КАРПОВ, канд. техн. наук,
Л. М. ПЕТРОВ, д-р техн. наук, А. В. ОВЧИННИКОВ, канд. техн. наук
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Комплексные технологии создания износостойких высоконагруженных компонентов эндопротезов крупных суставов из титановых сплавов¹

Для успешного применения титановых сплавов в производстве изделий медицинской техники необходимы комплексные подходы к выбору материалов, проектированию конструкций и технологий производства изделий, методам их испытаний, технологиям применения и т. д. Применительно к имплантируемым изделиям, в частности эндопротезам крупных суставов, такие подходы динамично развиваются в инженерно-медицинском центре "МАТИ-Медтех" "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского. Важнейшими результатами их реализации являются:

— использование только титановых сплавов для металлических компонентов эндопротезов (в том числе компонентов, испытывающих значительные циклические и фрикционные нагрузки), что позволяет наиболее полно реализовать в изделии важнейшие преимущества титановых сплавов — наилучшую биологическую совместимость, сравнительно низкий модуль упругости, высокую удельную прочность и др.;

— применение новых высокоэффективных технологий обработки, позволяющих управлять объемной и поверхностной структурой изделий и создавать необходимый комплекс физико-механических и функциональных свойств;

— разработка и внедрение в производство конструкций эндопротезов тазобедренного сустава, не уступающих, а по некоторым важнейшим функциональным параметрам превосходящих зарубежные аналоги.

Материаловедческие аспекты выбора металлических материалов для высоконагруженных компонентов эндопротезов крупных суставов и преимущества титановых сплавов рассмотрены в работах [1—3]. Данная работа посвящена разработке комплексной технологии обработки компонентов эндопротезов из титановых сплавов, функционирующих в условиях трения при высоких контактных нагрузках. В качестве материалов для таких компонентов в России применяют в основном титановые сплавы ВТ6 и ВТ20, разрешенные по биохимическим свойствам для имплантации. В частности, в шарнирном соединении искусственного тазобедренного сустава металлическая головка бедренного компонента работает в паре трения с компонентом из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ). Ножки бедренных компонентов находятся в подвижном контакте либо с цементной (полиметилметакрилат) мантией (цементная фиксация), либо с твердой кортикальной костью (бесцементная фиксация). Перемещение за один цикл нагружения невелико — от десятков микрометров в системе ножка — костный це-

мент или ножка — кость до нескольких миллиметров в шарнирной паре сустава. Однако эти перемещения повторяются многократно — миллионы циклов. Ввиду многоциклового характера нагрузки процессы износа и фреттинг-коррозии имплантатов из титановых сплавов, связанные с потерей механической связи оксидной пленки с поверхностью, становятся основными причинами большинства неудач, связанных с применением имплантатов из титановых сплавов. В частности, этим обусловлен износ обоих компонентов в системе головка сплав (ВТ6) — вкладыш (СВМПЭ) шарнирного соединения искусственного сустава [4] или интенсивное разрушение поверхности титановой ножки бедренного компонента при цементной фиксации [5]. Кроме того, нарушение целостности оксидной пленки на поверхности имплантата при его постоянном трении о кортикальную кость является причиной более интенсивного выделения ионов токсичных легирующих элементов в организм человека [6].

Таким образом, способность к самопассивации титана и его сплавов в биологических средах, сделавшая их одними из самых перспективных для имплантации, не исключает серьезных проблем при их применении в конструкциях, работающих в условиях трения и фреттинг-коррозии.

Анализ условий эксплуатации компонентов эндопротезов из титановых сплавов, работающих в условиях интенсивного трения и фреттинг-коррозии, позволяет сформулировать следующие требования к их конструктивным параметрам, структуре и свойствам поверхности и объема материала.

С целью минимизации коэффициента трения и, соответственно, работы фрикционных сил необходима максимальная чистота поверхности компонента (головки и части ножки, испытывающей циклические смещения большой амплитуды). Однако механическая полировка изделий из титановых сплавов весьма трудоемка вследствие высокой вязкости материала, приводящей к "налипанию" титана на частички абразива и "наволакиванию" его на полируемую поверхность. По данным авторов, на прутках из титановых сплавов ВТ20 и ВТ6 с хорошо проработанной глобулярной структурой не удается достичь параметра шероховатости $Ra < 0,05$ мкм даже при очень длительной полировке алмазными пастами. Недостаточная чистота поверхности способствует более быстрому разрушению оксидной пленки в процессе трения, ее фрагментации и отрыву от поверхности металла. Частицы оксида, внедряясь в поверхность полимерного материала пары трения, начинают играть роль абразива, что приводит к резкому увеличению скорости износа. Такое явление наблюдается, в частности, при испытаниях пары

¹Работа выполнена при финансовой поддержке грантов РФФИ 07-03-01012а и 06-04-90812 Мол_а.

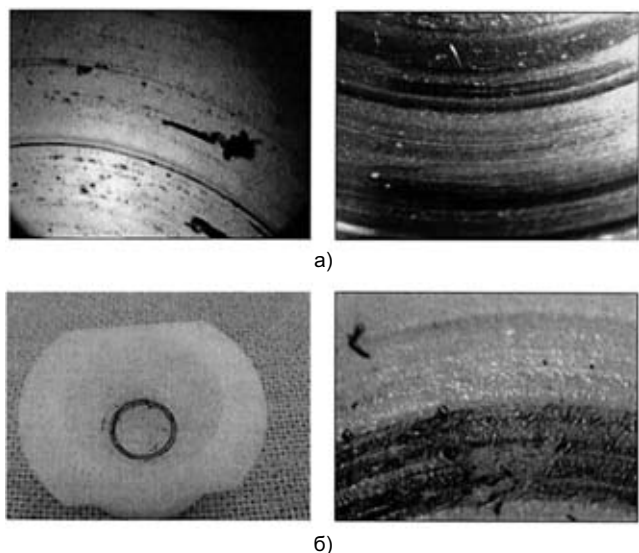


Рис. 1. Износ компонентов пары трения головки из сплава VT20 — вкладыш из СВМПЭ при испытании по методике работы [7]: а — поверхность головки. $\times 20$; б — вкладыш

трения головка из титанового сплава VT20 — вкладыш из СВМПЭ по методике работы [7] (рис. 1).

Для достижения требуемой износостойкости состав и структура поверхности имплантата должны обеспечивать высокую твердость. Однако значительный градиент твердости, возникающий при нанесении высокопрочных покрытий на вязкую и "мягкую" матрицу, не способствует улучшению триботехнических свойств. Так, попытка нанесения покрытий из нитрида титана на поверхность титановой бедренной головки, изготовленной из прутка сплава VT6, не принесла желаемого результата: в процессе эксплуатации наблюдали отслаивание покрытия в виде "яичной скорлупы" [6].

Известные технологии нанесения покрытий и модифицирования поверхности титановых сплавов с точки зрения применимости для компонентов пар трения проанализированы в работах [8, 9], в которых показана их низкая эффективность для обеспечения работоспособности высоконагруженных имплантатов.

В последнее время развиваются твердофазные технологии создания градиентных поверхностных структур в титановых сплавах путем легирования азотом при низкотемпературном ионном азотировании в газовой среде (смесь азота и аргона) с наложением электрического поля с низковольтной разностью потенциалов. Применение данных технологий позволит проводить регламентированное легирование азотом поверхности готовых деталей при температуре 550—600 °С и небольшом времени выдержки (до 1 ч), которое не влияет ни на микрогеометрию поверхности, ни на структуру, сформировавшуюся в объеме детали на предшествующих технологических стадиях получения и обработки полуфабрикатов. Это открывает перспективы создания на базе титановых сплавов новых материалов с градиентной поверхностной структурой, обеспечивающей реализацию в готовых изделиях высокого комплекса эксплуатационных свойств, в том числе стойкости против износа при трении или фреттинг-коррозии.

В работах [8—10] изложены экспериментальные результаты, касающиеся структурных аспектов низкотемпературного ионного азотирования титановых сплавов, применяющихся для изделий медицинской техники. В частности, установлено, что в сплавах VT20 и VT6, содержащих 7—10 % β -фазы, при ионном азотировании достигается максимальная глубина диффузионного слоя по сравнению с α -сплавами и более легированными β -стабилизаторами ($\alpha + \beta$)- и псевдо- β -сплавами. Это связано с особенностями взаимодействия азота с α - и β -фазами, влиянием фазового состава, степени легирования фаз, кинетики фазовых превращений на диффузионную подвижность азота. Данная технология обеспечивает не только формирование протяженной диффузионной зоны твердого раствора азота в титане, но и образование термодинамически устойчивых поверхностных слоев δ -(TiN) и ϵ -(Ti₂N) нитридов. Получение такой поверхностной градиентной микроструктуры существенно увеличивает и антикоррозионную способность поверхности, делая ее практически инертной в биологических средах [8].

Глубина диффузионной зоны зависит не только от фазового состава, но и от структуры сплавов. Для оценки этого влияния провели ионное азотирование образцов из сплава VT20 с разными типами и параметрами структуры (рис. 2): с пластинчатой α -фазой толщиной $h_\alpha = 2\div 3$ мкм и длиной $l_\alpha = 25\div 40$ мкм (поз. а), глобулярной α -фазой с размерами частиц $d_\alpha = 3\div 5$ мкм (поз. б) и субмикроструктурной α -фазой с размерами частиц $d_\alpha = 0,5\div 0,9$ мкм (поз. в).

Структура первого типа (см. рис. 2, а) по параметрам близка структуре заготовок ножек эндопротезов из сплава VT20Л, получаемых методом фасонного литья с последующим газостатированием. Структуру второго типа (см. рис. 2, б) имеют горячекатаные прутки из сплава VT20, из которых изготавливают шаровые головки бедрен-

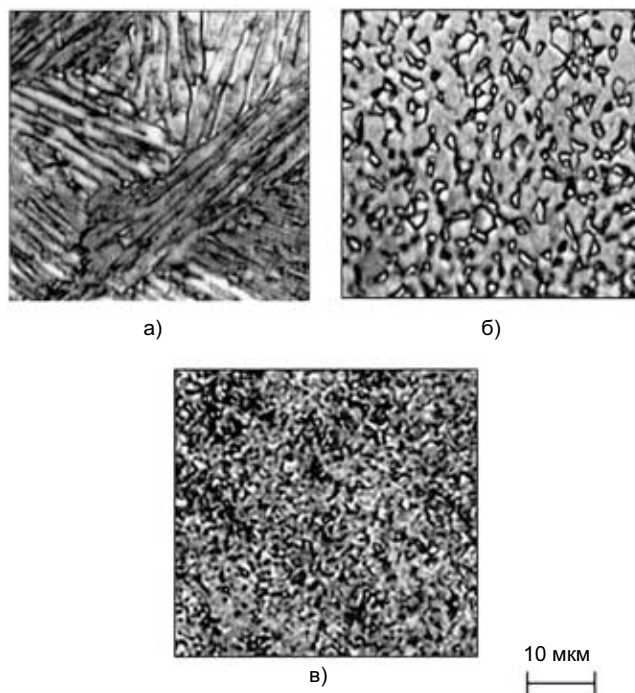


Рис. 2. Микроструктура образцов из сплава VT20 с различной степенью дисперсности частиц α -фазы

ных компонентов эндопротезов тазобедренного сустава. Структура третьего типа (см. рис. 2, в) может быть получена как в деформированных, так и литых полуфабрикатах термоводородной обработкой [11].

Ионное азотирование проводили в модифицированной установке "Булат" в смеси аргона и азота при температуре 550 и 600 °С; при этом время варьировали от 30 до 60 мин.

Результаты исследований показали, что состояние поверхности зависит как от температуры азотирования, так и параметров структуры. После азотирования при 550 °С формируется плотный практически беспористый слой нитрида титана, причем чем дисперснее α -фаза, тем выше качество поверхностного слоя. Увеличение температуры азотирования до 600 °С приводит к появлению на поверхности пор размером 1—2 мкм, и чем крупнее структурные составляющие α -фазы в исходном материале, тем большее количество таких пор обнаруживается в поверхностном слое.

Рентгеноструктурный анализ поверхности образцов показал, что температура азотирования и дисперсность структуры также влияют на фазовый состав и количество нитридов в приповерхностном слое. Так, после азотирования при 550 °С формируется в основном ϵ -нитрид (Ti_2N), а после обработки при 600 °С помимо ϵ -нитрида наблюдается также δ -нитрид (TiN).

Увеличение размеров α -частиц с 0,5—0,7 до 3—5 мкм практически не влияет на фазовый состав модифицированного слоя и количество нитридов (Ti_2N) и (TiN). Наиболее заметные изменения происходят при азотировании образцов с крупнопластинчатой структурой: резко увеличивается количество образующихся в поверхности нитридов. Увеличение размера частиц α -фазы с 0,5 до 3—5 мкм снижает протяженность диффузионной зоны, а переход к крупнопластинчатой морфологии приводит к дальнейшему уменьшению глубины азотированного слоя (см. таблицу). При этом уровень микротвердости как на поверхности, так и по всей глубине диффузионной зоны при субмикроструктурной структуре основы остается более высоким при обеих температурах азотирования (рис. 3).

Таким образом, результаты исследований показали, что дисперсность структуры существенно влияет на формирование модифицированной поверхности при ионно-вакуумном азотировании: чем больше размер струк-

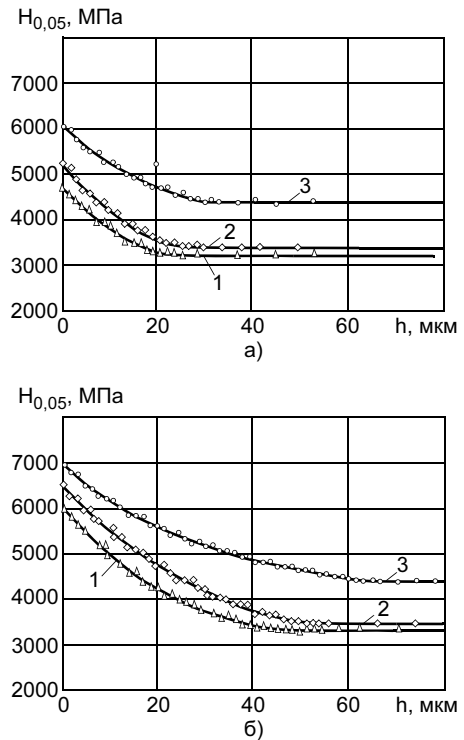


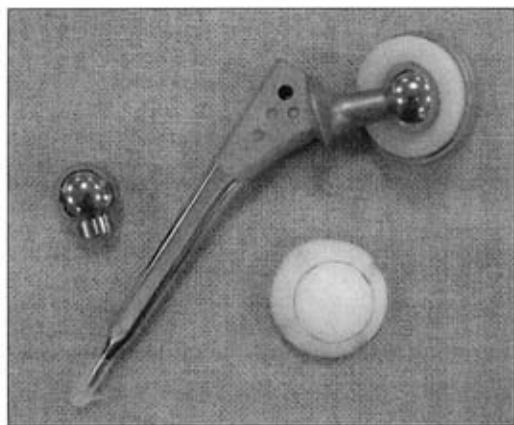
Рис. 3. Зависимость микротвердости от степени дисперсности структуры титанового сплава ВТ20 и глубины диффузионной зоны h при ионно-вакуумном азотировании: а, б — при 550 и 600 °С соответственно; 1—3 — см. поз. а—в на рис. 2 соответственно

турных составляющих, тем меньше глубина диффузионной зоны и тем большее количество нитридов образуется на поверхности. По-видимому, это связано с тем, что уменьшение протяженности межфазных границ замедляет диффузию азота вглубь материала и тем самым способствует его скоплению в поверхностных слоях и нитридообразованию.

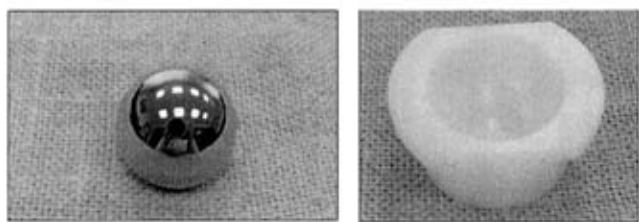
При проектировании комплексных технологий обработки компонентов эндопротезов необходимо учитывать характер и величину функциональных нагрузок. Головка эндопротеза тазобедренного сустава работает в условиях трения с высокими контактными нагрузками в агрессивной биологической среде. Ее структурное состояние должно обеспечивать низкий коэффициент трения в паре с СВМПЭ и высокую стойкость против износа и фреттинг-коррозии. Поэтому перед ионным азотированием в головке должна быть сформирована субмикроструктурная структура с размером структурных составляющих α -фазы менее 1 мкм.

Ножка эндопротеза кроме трения испытывает функциональные нагрузки, приводящие к формированию напряженно-деформированного состояния с растягивающими компонентами нормальных напряжений (изгиб) циклического характера. Таким образом, ее структура должна обеспечивать не только износостойкость, но и необходимые сопротивление усталости, пластичность и вязкость разрушения. Поэтому наиболее предпочтительна для ножки эндопротеза градиентная структура с субмикроструктурной α -фазой в поверхностном слое, обеспечивающей высокую работу зарождения усталост-

Режим азотирования	Глубина диффузионной зоны h , мкм	$H_{0,05}$, МПа	
		До азотирования	После азотирования
$d_{\alpha} = 0,5 \div 0,9$ мкм			
550 °С, 60 мин	32	4300	6100
600 °С, 30 мин	60		7000
$d_{\alpha} = 3 \div 5$ мкм			
550 °С, 60 мин	26	3400	5200
600 °С, 30 мин	50		6400
$h_{\alpha} = 2 \div 3$ мкм, $l_{\alpha} = 25 \div 40$ мкм			
550 °С, 60 мин	24	3200	4800
600 °С, 30 мин	45		6000



а)



б)

Рис. 4. Головка и ножка бедренного компонента цементной фиксации "Имплант-Ц" (а) и результаты ресурсного испытания головки в паре с СВМПЭ по методике работы [7] (б)

ной трещины, и пластинчатой α -фазой в сердцевине, обеспечивающей высокие вязкость разрушения и работу распространения трещин. Оба типа структур могут быть сформированы в заготовках изделий термоводородной обработкой [11] (см. рис. 2, в) независимо от структуры исходного полуфабриката (прутка, плиты, фасонной отливки). При этом структура сердцевины ножки будет идентична или близка исходной.

Следует отметить, что субмикроструктурная структура, формирующаяся при термоводородной обработке (ТВО) и обеспечивающая высокую твердость поверхностного слоя, значительно улучшает полируемость поверхности ножек и головок. Это позволяет достигать при механической полировке алмазными пастами параметр шероховатости $Ra = 0,02 \pm 0,03$ мкм на головках и $Ra = 0,05 \pm 0,08$ мкм на ножках. При этом продолжительность полирования головки не превышает 15 мин, а ножки — 25 мин.

Анализ проведенных исследований и учет особенностей эксплуатации позволяют сформулировать общий подход к построению технологических процессов изготовления и обработки компонентов эндопротезов. Этот подход заключается во введении в технологический процесс производства ТВО перед финишными операциями полирования и ионно-вакуумного азотирования. Этот принцип реализован в технологиях производства компонентов эндопротезов, разработанных в "МАТИ-Медтех" и внедренных в серийное производство в ЗАО "Имплант МТ" (Москва).

Рациональный выбор концентрационных, температурных и кинетических параметров ТВО позволяет сформировать в головках однородную субмикроструктурную структуру с размерами α -фазы 0,5—0,9 мкм. В ножках

формируется градиентная структура: мелкодисперсная с размерами частиц α -фазы 0,7—1,0 мкм в поверхностном слое глубиной до 3 мм и пластинчатая с размерами пластин α -фазы $h = 2 \div 4$ мкм, $l = 25 \div 50$ мкм в сердцевине.

Вакуумное ионно-плазменное азотирование осуществляется при температуре 500—600 °С ионами с первичной энергией от 60 до 200 эВ, что обеспечивает их глубокое проникновение в материал и исключает образование на поверхности сплошного слоя нитридных фаз на ранних стадиях процесса. При этом энергия ионов не приводит к "распылению" материала поверхности и практически не ухудшает чистоту полированной поверхности. Так, параметр шероховатости на готовых изделиях составляет: на головках — 0,03—0,04 мкм, на ножках — 0,08—0,1 мкм, что соответствует установленным требованиям. В результате азотирования на изделиях образуется упрочненный поверхностный слой, состоящий из слоя нитридов титана состава от Ti_2N до TiN и подповерхностного слоя твердых растворов азота в α - и β -фазах общей глубиной не менее 50 мкм. Микротвердость поверхности составляет не менее 6000 МПа.

Изделия, изготовленные по разработанным технологиям (рис. 4), успешно прошли цикл технических испытаний, квалификационные испытания по ISO 7206-4, клинические испытания и внедрены в серийное производство. За семилетний период эксплуатации не зарегистрировано ни одного случая отказа эндопротезов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Применение титана и материалов на его основе в медицине* / А. А. Ильин, В. Н. Карпов, А. М. Мамонов, М. Ю. Коллеров // *Ti—2006 в СНГ*, 2006. С. 324—327.
2. *Применение материалов на основе титана для изготовления медицинских имплантатов* / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, А. М. Мамонов, В. Н. Карпов // *Металлы*. 2002. № 3. С. 97—104.
3. *Применение титана и его сплавов в медицине* / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, А. М. Мамонов и др. // *Перспективные технологии легких и специальных сплавов*. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. С. 399—408.
4. *Титановые сплавы в эндопротезировании тазобедренного сустава* / Н. В. Загородний, А. А. Ильин, В. Н. Карпов и др. // *Вестник травматологии и ортопедии им. Н. Н. Приорова*. 2000. № 2. С. 73—76.
5. *Nilfert H. G., Broback L. G. Crevice corrosion of cemented titanium alloy stems in total hip replacement* // *Clinical orthopaedics and related research*. 1996. N 333. P. 51—75.
6. *Semlitsch M., Staub F., Weber H. Titanium-aluminum-niobium alloy, development for biocompatible, high strength surgical implants* // *Sonderdruck aus biomedizinische technik*. 1985. N 30 (12). P. 334—339.
7. *Гаврюшенко Н. С. Методика испытания качества узлов трения эндопротезов тазобедренного сустава человека* // *Материалы VI съезда травматологии и ортопедии*. Н.-Новгород, 1997. С. 537—538.
8. *Низкотемпературное ионное азотирование имплантатов из титанового сплава VT20 в различных структурных состояниях* / А. А. Ильин, С. В. Скворцова, Е. А. Лукина и др. // *Металлы*. 2005. № 2. С. 38—44.
9. *Ионно-вакуумное азотирование как способ повышения трибо-технических характеристик титановых сплавов* / С. В. Скворцова, А. А. Ильин, Л. М. Петров и др. // *Ti—2005 в СНГ*. 2005. С. 231—236.
10. *Структурные аспекты ионного азотирования титановых сплавов* / А. А. Ильин, С. Я. Бецофен, С. В. Скворцова и др. // *Металлы*. 2002. № 3. С. 6—15.
11. *Водородная технология титановых сплавов* / А. А. Ильин, Б. А. Колачев, В. К. Носов, А. М. Мамонов. М.: МИСиС, 2002. 392 с.

И. В. ШЕВЧЕНКО, д-р техн. наук, Н. В. ЛОГВИНЕНКО, аспирант
"МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского

Метод тепловизионного контроля тепловых характеристик охлаждаемых лопаток газовых турбин

Применение термографии в неразрушающем контроле позволяет выявлять дефекты в деталях газотурбинных установок.

Рентгеновский метод имеет ряд значительных технических недостатков¹, которые не позволяют надежно контролировать тепловые характеристики охлаждаемых лопаток.

Контроль эффективности охлаждения лопаток целесообразно проводить с помощью тепловидения, используя теорию регулярного теплового режима, сравнивая темпы охлаждения изготовленной лопатки с эталонной, т. е. удовлетворяющей расчетной эффективности охлаждения как вдоль профиля, так и по ее длине.

При заданных температурах газа, обтекающего лопатки, и воздуха, их охлаждающего, интенсивность теплообмена может характеризоваться безразмерной относительной температурой данной точки рассматриваемой лопатки θ . Величину θ при условии равенства поверхности нагрева и охлаждения на рассматриваемом участке лопатки можно представить в виде

$$\theta = \frac{K_{\phi} \alpha_{\text{в}} / \alpha_{\text{г}}}{K_{\phi} \alpha_{\text{в}} / \alpha_{\text{г}} + 1},$$

где K_{ϕ} — коэффициент формы, учитывающий отличие формы рассматриваемого участка лопатки от тонкой плоской стенки; $\alpha_{\text{г}}$ и $\alpha_{\text{в}}$ — коэффициенты теплоотдачи со стороны газа и воздуха соответственно.

Для данной решетки лопаточных профилей и условий обтекания их потоком газа локальные значения $\alpha_{\text{г}}$ являются вполне определенными, а K_{ϕ} определяется размерами и формой рассматриваемого участка лопатки и практически не зависит от изменения $\alpha_{\text{в}}$. Следовательно, для конкретной лопатки значение θ будет зависеть от $\alpha_{\text{в}}$. Но так как значение $\alpha_{\text{в}}$ при заданном перепаде давлений охлаждающего воздуха на входе и выходе из лопатки в свою очередь будет определяться формой и размерами внутренних каналов, то изменение последних будет характеризовать изменение интенсивности охлаждения.

Таким образом, значение θ контролируемых лопаток будет отличаться от расчетного в тех случаях, когда на соответствующих участках будут отличаться форма и размеры стенки лопатки и каналов охлаждения, т. е. когда будет отличаться от расчетного значения произведение $K_{\phi} \alpha_{\text{в}}$.

Выявить это отличие и провести отдельную проверку каждого из сомножителей, сопоставив их значения с расчетными, позволяет теория регулярного теплового режима, в данном случае при охлаждении лопатки.

Решение уравнения теплопроводности в процессе охлаждения произвольного по форме, однородного и изотропного тела в среде с постоянной температурой, на-

чальное распределение которой при $\tau = 0$ задано известной функцией координат $f(x, y, z) = T_0$, выражается бесконечным рядом

$$T(x, y, z, \tau) = c_1 \vartheta_1 e^{-m_1 \tau} + c_2 \vartheta_2 e^{-m_2 \tau} + \dots, \quad (1)$$

где ϑ_1, ϑ_2 — функции координат точек (все конечные); m_1, m_2 — ряд возрастающих дискретных чисел; постоянные коэффициенты c_1 и c_2 определяют при подчинении общего решения начальным условиям

$$T_0 = f(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} c_n \vartheta_n,$$

т. е. их нахождение связано с разложением функции $f(x, y, z)$ в ряд по собственным функциям.

С ростом времени τ все члены ряда (1) убывают и очень скоро становятся пренебрежимо малыми. Поэтому температура T какой-либо произвольной точки тела задолго до достижения им температуры окружающей среды в рассматриваемом случае ($T_0 = 0$) будет определяться практически первым членом ряда (1), т. е. следовать экспоненциальному закону

$$T(x, y, z, \tau) = c_1 \vartheta_1 e^{-m_1 \tau} + c_2 \vartheta_2 e^{-m_2 \tau} + \dots,$$

$$T(x, y, z, \tau) = c_1 \vartheta_1(z, y, z) e^{-m_1 \tau}. \quad (2)$$

Момент, когда изменение температуры всех точек тела следует этой зависимости, является началом регулярного или, как его называют, упорядоченного теплового режима. Поскольку $\vartheta_1(z, y, z)$ не зависит от начальных условий, а c_1 хотя и определяется из начальных условий, но не зависит от координат точки и является постоянной для всех точек тела, то при наступлении регулярного режима можно считать, что начальное тепловое состояние тела не влияет на изменение температуры во времени во всех его точках.

Прологарифмировав выражение (2), получим

$$\ln T = -m_1 \tau + F(x, y, z), \quad (3)$$

откуда

$$\frac{\partial \ln T}{\partial \tau} = m_1.$$

Таким образом, $\ln T = f(\tau)$ в области регулярного теплового режима для всех точек тела приобретает линейный характер с одинаковым углом наклона, равным m_1 .

Величину m называют темпом прогрева. Весьма важным является то, что поле температур в теле в процессе регулярного режима, в данном случае при охлаждении, остается подобным самому себе, поскольку отношение температур любых двух точек тела становится постоянным и не зависит от времени, а определяется лишь координатами этих точек.

¹Артемов В. В., Шевченко И. В., Хронин В. С. Исследование образования эксплуатационных отложений в охлаждаемых лопатках газовых турбин авиационных двигателей // Авиационная промышленность. 2004. № 3. С. 14—18.

Когда температура окружающей среды не равна нулю, то под T в выражении (3) следует понимать разность температур тела и среды, т. е. $T = T_n - T_0$.

Значение m можно определить, замеряя изменение температуры какой-либо точки охлаждаемого тела во времени. Затем, построив график $\ln T = f(\tau)$, необходимо выбрать на прямолинейном его участке две точки с координатами τ_1, T_1 и τ_2, T_2 для определения зависимости

$$m = \frac{\ln[(T_1 - T_0) - (T_2 - T_0)]}{\tau_2 - \tau_1}. \quad (4)$$

Однако при охлаждении тела на начальной стадии процесса изменения температуры отдельных точек определяются не внешними условиями [$T_n(x, y, z) = T_0$], а самим начальным распределением. С течением времени влияние начальных условий ослабевает, и начиная с какого-то значения τ_1 температура всех точек тела уменьшается по одинаковому экспоненциальному закону, т. е. наступает регулярный режим. Тогда в соответствии с выражением (2)

$$T = c_1 \vartheta_1 e^{-m_1 \tau}; \quad c_1 = \text{const}; \quad \vartheta = \vartheta(x, y, z).$$

Если в рассматриваемом теле критерий

$$Bi = \frac{\alpha_B l}{\lambda} \ll 1,$$

то можно считать, что температура быстро выравнивается и в каждый момент времени близка к постоянной, равной температуре его поверхности.

Считая теплофизические свойства тела в данном диапазоне охлаждения постоянными, получим из уравнения теплового баланса, приравнивающего количество теплоты, поступившей через поверхность тела, к изменению его энтальпии

$$\frac{d \ln T}{d\tau} = \frac{\alpha_B F}{\rho c V} = m \quad (5)$$

или

$$\frac{T - T_n}{T - T_{\tau=0}} = e^{m\tau}, \quad (6)$$

где T — предельная температура лопатки при $\tau = \infty$; F — площадь поверхности тела; c, ρ — удельная теплоемкость и плотность материала; V — объем тела; $m = \text{const}$ — темп охлаждения; T_n — мгновенная температура тела, одинаковая по всему объему V и поверхности F ($Bi \ll 1,0$); $T_{\tau=0}$ — температура тела в начальный момент времени.

Тогда при $Bi \ll 1,0$ регулярный режим устанавливается практически сразу после начала процесса. При $Bi \rightarrow \infty$ и $\alpha_B \rightarrow \infty$ задача сводится к условию $T_n = T_0$ и темп охлаждения стремится к определенному конечному пределу, не зависящему от Bi и прямо пропорциональному коэффициенту теплопроводности тела a , т. е. $m = ak$ — зависит лишь от формы и размеров тела.

Важным для практики является то, что с увеличением Bi темп охлаждения m весьма быстро приближается к предельному значению m_∞ , соответствующему $Bi \rightarrow \infty$. Наружную поверхность тонкостенных лопаток, нагретых до температуры не более 470 К и находящихся в неподвижной окружающей среде при продувке через внутренние каналы охлаждающего воздуха, можно считать практически теплоизолированной, а следовательно, пренебречь перетоком теплоты вдоль их профильной части и изменением температуры по толщине стенки. В этом слу-

чае распределение температуры в теле лопатки может быть описано уравнением

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a_2 \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\alpha_B}{c\rho\delta} (T - T_B) + \frac{1}{c\rho} \frac{\partial \lambda}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right)^2, \quad (7)$$

где δ — толщина стенки; a — коэффициент проводимости температур; λ — коэффициент теплопроводности материала.

Последним членом этого уравнения можно пренебречь потому, что теплофизические свойства материала лопатки в требуемом для контроля интервале температур остаются практически неизменными.

При малых значениях Bi принятые условия не внесут существенных погрешностей при сравнительном определении коэффициента теплоотдачи α_f для граничных условий III рода. Так, при $Bi < 0,2$ погрешность определения α_B не превысит 10 %, а при $Bi < 0,1$ она составит 5 %.

Известно, что экспериментальные данные при исследовании конвективного теплообмена могут быть обобщены критериальными соотношениями вида $Nu = ARe^n$. С учетом зависимости (5) можно записать

$$\alpha_B = m\rho c V / F.$$

Если заменить произведение $\rho V = M$, то $\alpha_B = m M / F$, где c также является величиной постоянной по оговоренным выше условиям. Так как $Nu = \alpha_B l / \lambda$, а $\lambda = \text{const}$, то

$$m = f(Re). \quad (8)$$

Используя приведенные зависимости, можно контролировать интенсивность охлаждения изготавливаемых лопаток, сравнивая каждую из них при помощи тепловизора с лопаткой, имеющей расчетное значение интенсивности охлаждения на различных участках профильной части.

Поскольку при $\alpha_f = \text{const}$ глубина охлаждения для любого участка лопатки является однозначной функцией произведения $K_{\phi} \alpha_B$, то одно и то же значение этого произведения может быть получено при различных значениях сомножителей. Например, если значение α_B меньше принятого в расчете, а K_{ϕ} больше него, то их произведение приемлемо. Однако нет уверенности, что запас прочности лопаток сохранится в допустимых пределах. Вероятней всего, что он уменьшится. Поэтому возникает необходимость в отдельном контроле значений каждого из множителей, который можно осуществить, используя метод регулярного теплового режима.

Так, толщина стенки лопатки на любом из участков профиля может быть определена с помощью предельного темпа прогрева m . В свою очередь, как было показано, темп прогрева m однозначно зависит от коэффициента теплоотдачи:

$$\alpha_B = k_1 m,$$

где $k_1 = \rho c V / F$.

Таким образом, чтобы установить контрольные значения темпа прогрева, определяемые толщиной стенки лопатки и соответствующие требуемому значению θ какого-либо участка лопатки, необходимо располагать экспериментальными зависимостями $\Delta = f(m_\infty)$ и $m = f(\theta)$.

Для проведения тепловизионного контроля лопаток охлаждения газовых турбин разработана установка (рис. 1).

Базовым элементом испытательной установки является стол рабочего участка, на котором устанавливается рабочий участок 2 с объектом испытания 1 и крепятся подводные коллекторы, связывающие рабочий участок с системой управления.

Рабочий участок соединяет объект исследования (лопатку) с воздушной магистралью установки и представляет конструктивный узел, исследуемую опытную лопатку. Конструкция рабочего участка разрабатывается для каждой модели лопатки отдельно и определяется задачами испытаний. Так как рабочий участок не должен оказывать влияния на тепловое состояние объекта испытаний при их проведении и обеспечивать требуемые параметры охлаждающего воздуха на входе в лопатку, к нему предъявляют следующие требования: возможность продувки охладителем лопатки при испытаниях с выдувом его в атмосферу; минимальный теплоотвод от лопатки по рабочему участку; отсутствие массивных элементов соединительных узлов с целью снижения теплоаккумуляционной способности конструкции.

Блок управления обеспечивает подачу охлаждающего воздуха в рабочую зону и начальные температурные и гидравлические условия испытаний. Воздушная магистраль состоит из компрессора 10, подающего воздух в рабочую зону, фильтра 9 для очистки воздуха, ресиверов 8 и 4 для снижения турбулентности потока, расходомерного участка 6 с термопарой и манометром для снятия начальных условий и электропневмоклапана 5 для автоматического направления охлаждающего воздуха в рабочую зону (см. рис. 1).

Подсистемой блока управления станда является система подогрева 18 (см. рис. 1), применяемая для задания температуры тела лопатки при испытаниях. Так же, как и к рабочему участку станда, к устройствам и приборам блока управления предъявляют ряд функциональных требований: работоспособность станда в целом и достоверность контролируемых параметров.

Измерительная система станда представляет блок-анализатор 13 (тепловизор NEC 7100), связанный кабелем с ПК. Измерительная система обеспечивает возможность визуализации снимаемой информации при испытаниях и ее запись для последующей обработки (рис. 2).

Существует несколько вариантов установки, отличающихся в основном степенью соответствия реальным условиям эксплуатации лопаток на двигателе, конструкцией испытываемой лопатки, габаритными размерами, а также режимами проведения испытаний, рабочим телом охладителя и его давлением. Такие установки применяют для определения аномалий в теплопроводности охлаждаемых лопаток, например, позволяют оценить засоренность каналов охлаждения или выявить внутренние дефекты материала детали.

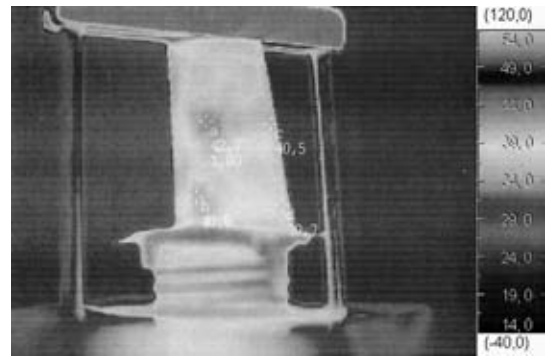


Рис. 2. Кадртермограмма, фиксируемая тепловизором в процессе эксперимента

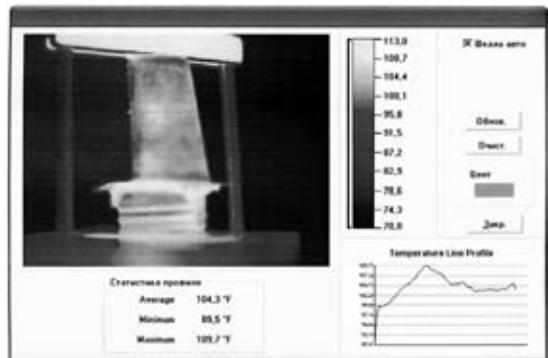


Рис. 3. Обработка результатов эксперимента на ПК

Процесс контроля заключается в том, что из лопаток, прошедших обычные контрольные операции и имеющих близкий к номинальному расход воздуха G_B (при продувке), отбирают несколько штук, препарируют их термопарами и проводят испытания на пакетной установке. Лопатку, имеющую $\theta = f(\bar{G}_B)$, наиболее близкую к расчетной, испытывают на нестационарных тепловых режимах, замеряя тепловизором ее температуру с целью определения зависимостей $m = f(Re)$ или, что одно и то же, $f = f(G_B)$ для различных участков этой лопатки и установления предельного темпа охлаждения m_∞ . Таким образом, выявляется так называемая эталонная лопатка. Полученные при ее испытании зависимости сравнивают с замеренными на контролируемой лопатке и по их разнице судят о ее пригодности (рис. 3).

Для ряда конструкций охлаждаемых лопаток эти результаты позволяют установить, по каким причинам интенсивность охлаждения различных участков контролируемой лопатки отличается от эталонной — из-за отклонений размеров и формы внутренних каналов или из-за изменения толщины стенки.

Внедрение данного метода на авиаремонтных предприятиях позволит повысить эффективность и качество контроля лопаток и предотвратить установку некондиционных деталей на двигатель.

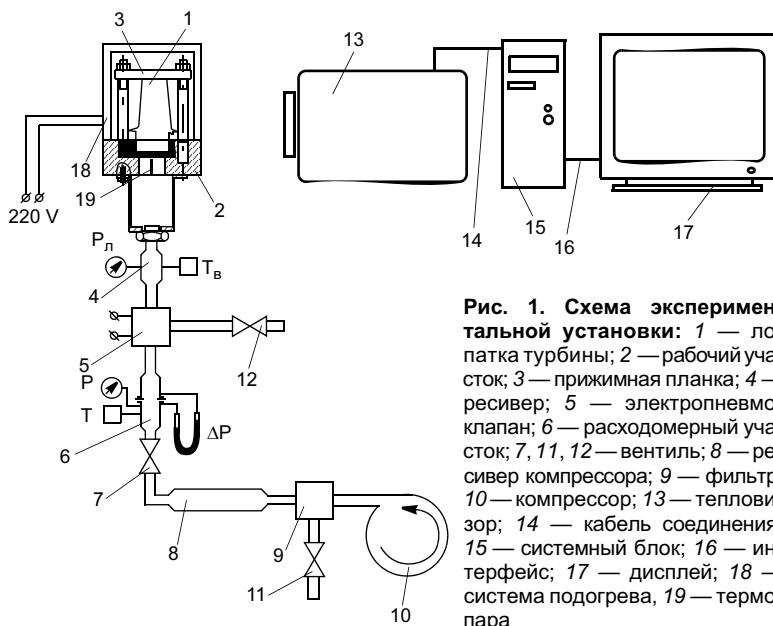


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лопатка турбины; 2 — рабочий участок; 3 — прижимная планка; 4 — ресивер; 5 — электропневмоклапан; 6 — расходомерный участок; 7, 11, 12 — вентиль; 8 — ресивер компрессора; 9 — фильтр; 10 — компрессор; 13 — тепловизор; 14 — кабель соединения; 15 — системный блок; 16 — интерфейс; 17 — дисплей; 18 — система подогрева; 19 — термопара

А. П. КОВАЛЕВ, канд. техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Оценка несущей способности поверхностного слоя деталей вдавливанием сферического индентора

Современные тенденции в развитии материаловедения и технологии модифицирования поверхностных слоев направлены на получение заданных физико-механических параметров с учетом условий эксплуатации деталей. Особую актуальность это приобретает при решении задач обеспечения эксплуатационных показателей. Правильное их решение основано не только на обоснованном выборе режимов и методов технологического воздействия (нанесении покрытий, химико-термической обработке и др.), но и в возможностях достоверной оценки и прогнозирования такого воздействия.

Наряду с традиционными методами определения механических свойств материалов (испытания на растяжение, сжатие, оценка твердости и микротвердости и др.) определенный интерес представляет метод, основанный на непрерывной регистрации нагрузки и глубины внедрения индентора [1]. В работе [1] и других публикациях рассматривается индентор в форме стандартной пирамиды, применяемой при измерении микротвердости и твердости по Виккерсу. Особенность при использовании пирамидального наконечника заключается в получении геометрически подобных отпечатков с неизменной степенью деформации, что можно отнести к определенному недостатку. При использовании индентора сферической формы степень деформации переменна на всем этапе вдавливания и первичным результатом такого испытания является диаграмма нагружение — разгрузка [2] (рис. 1).

Участок нагружения 0—1—2 можно описать формулой

$$P_i = a(h_{\Sigma j} - h_{\Sigma yj})^n + P_{y0},$$

где P_i — текущая сила вдавливания индентора; a — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала и размеров индентора; $h_{\Sigma j}$ — текущая глубина внедрения индентора при нагружении; $h_{\Sigma yj}$, P_{y0} — глуби-

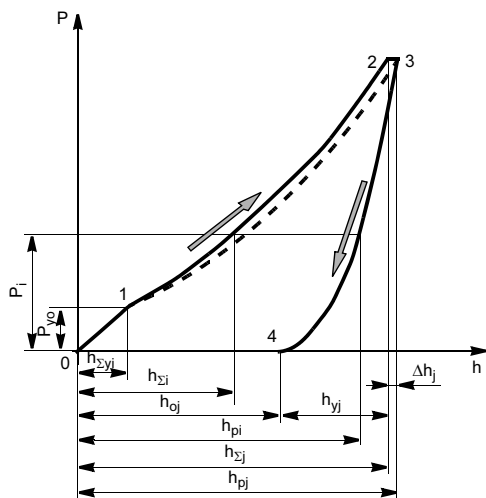


Рис. 1. Типовая диаграмма вдавливания сферического индентора в упругопластическое полупространство

на и сила, соответствующие переходу от упругого контакта к пластическому; n — показатель.

При разгрузке отпечатка (кривая 3—4) происходит релаксация энергии, накопленной в процессе упругопластического деформирования. Связь между силой P и упругим h_y восстановлением ($h_{yj} = h_{pi} - h_{0j}$) описывается зависимостью

$$P_i = b_j(h_{pi} - h_{0j})^m, \quad (1)$$

где b_j — коэффициент, зависящий от физико-механических свойств материала и размеров индентора; h_{pi} — текущее значение глубины внедрения при разгрузке; h_{0j} — остаточная глубина внедрения, соответствующая конечной (j -й) точке при нагружении; m — показатель.

Важным практическим свойством кривой упругого разгрузки отпечатка является независимость от характера распределения давления под индентором [1, 3]:

$$\frac{dP}{dh} = \frac{d_{отп}}{e_0} = \frac{2\sqrt{F}}{\sqrt{\pi}e_0}, \quad (2)$$

где dP/dh — первая производная уравнения кривой разгрузки; $e_0 = e + e_1 = (1 - \mu^2)/E + (1 - \mu_1^2)/E_1$ (e , e_1 — упругие константы исследуемого материала и индентора, μ , μ_1 — коэффициенты Пуассона для исследуемого материала и индентора, E , E_1 — модули Юнга исследуемого материала и индентора); F — площадь проекции отпечатка.

Дифференцируя выражение (1) при допущении о равенстве площади проекции отпечатка площади его поверхности и справедливости для j -й (конечной) точки диаграммы вдавливания равенств $h_{pi} - h_{0j} = h_{\Sigma j} - h_{0j}$ и $b_j = P_j/(h_{\Sigma j} - h_{0j})^m$, формула (2) после соответствующих преобразований при условии $m = 1,5$ примет следующий вид:

$$h_{\Sigma}^3 - 2h_0h_{\Sigma}^2 + h_0^2h_{\Sigma} = (DP)^2,$$

где $D = \frac{3}{4\sqrt{2}R} (e + e_1)$ (R — радиус сферического индентора).

$$\text{Для абсолютно жесткого индентора } D = \frac{3(1 - \mu^2)}{4\sqrt{2}RE}.$$

Одним из параметров, характеризующих упругопластическое взаимодействие при вдавливании сферического индентора, является среднее контактное давление q , которое представляет отношение приложенной силы P к площади контакта. Для сравнительной оценки удобнее использовать площадь поверхности отпечатка. С учетом полученных зависимостей можно записать формулы для расчета средних контактных давлений при разгрузке q_{pi} и нагружении q_{ni} :

$$q_{ni} = \frac{a}{2\pi R} h_{\Sigma i}^{n-1};$$

$$q_{pi} = \frac{b_j}{2\pi R} \frac{h_{\Sigma j}}{h_{\Sigma j} - h_{0j}} (h_{pi} - h_{0j})^{m-1}.$$

Величину контактных давлений целесообразно рассматривать в зависимости от степени деформации в отпечатке ε , которая в отличие от конуса и пирамиды при вдавливании сферического индентора переменна из-за нарушения геометрического подобия лунки. Кроме того, степень деформации для сравнительной оценки удобна тем, что она безразмерна.

Согласно поставленной цели, подбирали соответствующие эквиваленты деформации в лунке, при этом рассматривали остаточные параметры отпечатков и принимали во внимание особенности их упругого восстановления.

С целью выбора той или иной расчетной зависимости были выдвинуты следующие требования:

- возможность расчета степени деформации при разгрузке ε_{pi} ;
- возможность определения модуля Юнга исследуемого материала по участку разгрузки из пластической области в координатах контактные давления — степень деформации;
- возможность определения модуля Юнга исследуемого материала на упругом участке нагружения в координатах контактные давления — степень деформации.

Анализ показал, что поставленным требованиям наилучшим образом соответствуют следующие расчетные формулы для определения степени деформации в отпечатке при нагружении ε_{ni} и разгрузке ε_{pi} :

$$\varepsilon_{ni} = k_\varepsilon \sqrt{\frac{h_{\Sigma i}}{R}}; \varepsilon_{pi} = k_\varepsilon \frac{h_{pi}}{\sqrt{R h_{\Sigma i}}}$$

где $k_\varepsilon = \frac{2\sqrt{2}}{9\pi(1-\mu^2)}$, при $\mu = 0,3$ $k_\varepsilon = 0,10993$.

При испытании образцов на сжатие процесс деформации описывают соотношением $\sigma = B\varepsilon^\alpha$ [4].

Проведенный анализ показал существование при вдавливании сферического индентора аналогичного соотношения между q и ε :

$$q = B\varepsilon^\alpha,$$

где B — константа, соответствующая контактным давлениям при $\varepsilon = 1$, зависящая от свойств материала и равная $\frac{aR^{n-2}}{2\pi k_\varepsilon^\alpha}$;

α — показатель, учитывающий рост контактных давлений от деформации, равный $2(n-1)$.

По полученным зависимостям провели расчет q и ε , подтвердивший, что рассматриваемая методика позволяет достоверно определять упругий участок деформирования материала (рис. 2), модуль упругости, склонность поверхностных слоев к упрочнению и другие характеристики. Установлено также, что предельная упругая деформация ε_y (условный предел текучести) для большого числа исследованных образцов из титановых сплавов с разной механической и термической обработкой находится на уровне 0,65 %.

Математическая обработка диаграммы вдавливания позволяет не только решить вопрос о построении диаграммы контактные давления (напряжения) — деформация (рис. 3), но и расширить число показателей для оценки несущей способности поверхностного слоя деталей.

Важно подчеркнуть, что для сравнительного анализа абсцисса точки B ($\varepsilon_B \approx 1,1$ %) на диаграмме выбрана из тех соображений, что в ней пересекаются все кривые $q = \varphi(\varepsilon)$ независимо от искусственно варьируемой величины показателя n и от исследуемого материала и его состояния (рис. 4). Правильность определения n заметно влияет на точность расчетов.

Показатели несущей способности, характеризующие поведение материала в упругой и упругопластических областях, представлены в табл. 1.

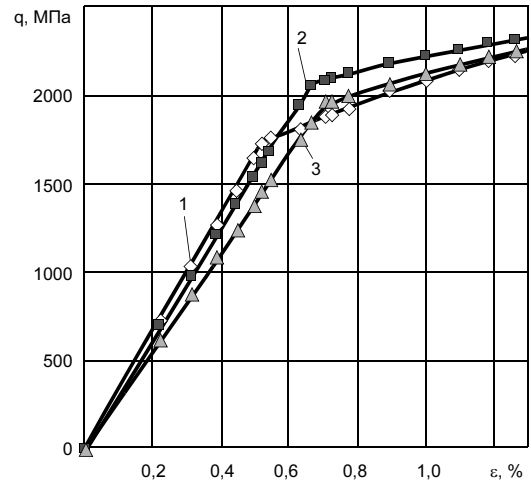


Рис. 2. Расчетная зависимость контактного давления q от степени деформации ε для титанового сплава ВТ3-1 с различной обработкой: 1 — шлифование (пруток отожжен); 2 — газонасыщение, $t = 860$ °С, $\tau = 1,25$ ч; 3 — газонасыщение, $t = 860$ °С, $\tau = 1,25$ ч + вакуумный отжиг, $t = 750$ °С, $\tau = 1$ ч

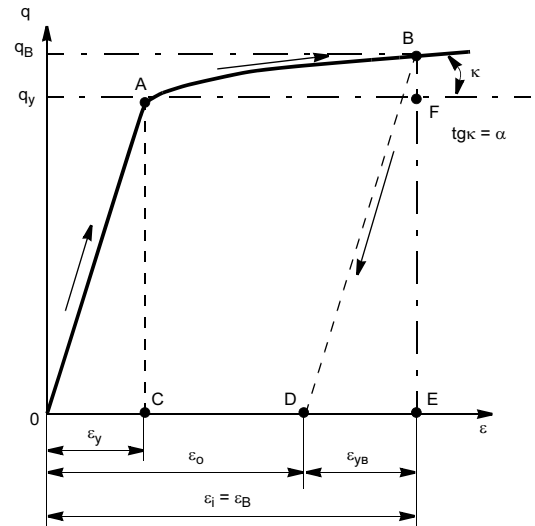


Рис. 3. Схематизированная диаграмма напряжения — деформации

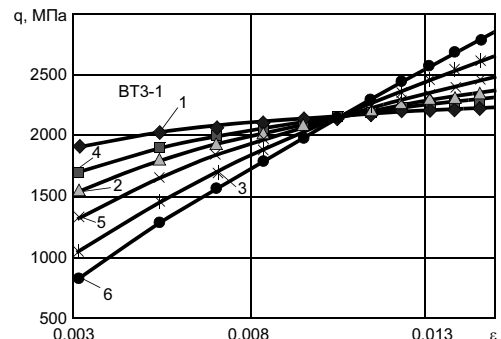


Рис. 4. Зависимость контактного давления q от степени деформации ε при n , равном 1,05 (1), 1,141 (2), 1,3 (3), 1,1 (4), 1,2 (5) и 1,4 (6)

Таблица 1

Показатель	Расчетная формула	Графическая интерпретация
Модуль упругости	E	
Предел текучести (упругости)	$q_y = B \left(\frac{B}{3E} \right)^{\alpha/(1-\alpha)} = 3E\varepsilon$	Ордината точки А
Упругая деформация	$\varepsilon_y = \left(\frac{B}{3E} \right)^{\alpha/(1-\alpha)}$	Абсцисса точки А
Прочность при $\varepsilon = 1,1\%$	$q_{1,1} = B0,011^\alpha$	Ордината точки В
Удельная энергия упругой деформации u_y	$u_y = 1,5E\varepsilon_y^2$	ОАС
Общая удельная энергия деформации u	$u = 1,5E\varepsilon^2 + \int_{\varepsilon_y}^{\varepsilon_{1,1}} B\varepsilon^\alpha d\varepsilon$ $u = 1,5E\varepsilon^2 + \frac{B}{\alpha+1} (\varepsilon_{1,1}^{\alpha+1} - \varepsilon_y^{\alpha+1})$	Площадь OABE
Удельная энергия упругого восстановления $u_{ув}$	$u_{ув} = \frac{1}{2} q_{1,1} \varepsilon_{ув} = \frac{B\varepsilon_{1,1}^\alpha}{2} \frac{B}{3E} \varepsilon_{ув}^\alpha$ $\varepsilon_{ув} = \frac{B}{3E} \varepsilon_{1,1}^\alpha$	Площадь DBE
Удельная энергия упругочтения $u_{упр}$	$u_{упр} = \frac{B}{\alpha+1} (\varepsilon_{1,1}^{\alpha-1} - \varepsilon_y^{\alpha-1}) - 3E\varepsilon_y(\varepsilon_{1,1} - \varepsilon_y)$	Площадь ABF

При этом оценку состояния поверхностного слоя деталей по рассматриваемым показателям несущей способности можно проводить как с точки зрения условий нагружения при эксплуатации, так и с точки зрения прогнозирования поведения материала при его обработке поверхностным (объемным) пластическим деформированием.

Выбор показателя может быть обусловлен тем видом напряженного состояния, при котором происходит эксплуатация детали, упругопластическое формоизменение в технологическом процессе. Например, чем меньше энергия упругой деформации, тем меньше энергетические потери при качении твердого тела. Чем больше предел текучести (упругости), тем выше несущая способность при контактной выносливости, износе, усталостной прочности, чем меньше энергия упрочнения, тем легче осуществить пластическое формоизменение материала, чем выше контактные давления при определенной деформации (в данном случае $\varepsilon = 1,1\%$), тем выше несущая способность.

В качестве примера в табл. 2 приведены результаты расчетов для титанового сплава ВТЗ-1, из которых, в частности, следует, что удельная энергия упрочнения (склонность к упрочнению при пластической деформации) возрастает в ряду 13, 11, 12, 14, 15, 10. По пределу упругости q_y ряд образцов в порядке убывания: 11, 12, 13, 15, 14, 10. Полученные результаты свидетельствуют о наличии роста механических свойств поверхностного слоя титановых деталей после химико-термической обработки, режимы которой неоднозначно влияют на рассматриваемые показатели.

Упрочнение поверхностным пластическим деформированием (алмазным выглаживанием) неоднозначно влияет на показатели несущей способности поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТЗ-1 (рис. 5).

Состояние поверхности образцов и режим ГНС приведены в табл. 3.

При обработке с силой $P_y = 100$ Н с радиусом инструмента $R_{сф} = 1,5$ мм отмечается рост всех показателей, а при си-

Таблица 2

Состояние поверхности	Номер образца	ε_y %	$E \cdot 10^{-4}$, МПа	q_y , МПа	$q_{1,1}$, МПа	Удельная энергия, Н · мм/мм ³			
						u_y	u	$u_{ув}$	$u_{упр}$
Шлифование. Прутки отожжены ГНС	10	0,53	10,9	1714	2133	4,51	15,6	6,9	1,305
	11	0,67	10,2	2058	2251	6,90	16,2	8,2	0,441
	12	0,70	9,2	1938	2166	6,82	14,9	8,5	0,475
	13	0,73	8,8	1929	2104	7,03	14,5	8,4	0,341
	14	0,71	8,8	1872	2137	6,65	14,5	8,7	0,541
ГНС + ВО, $p = 665 \cdot 10^{-2}$	15	0,67	9,5	1895	2183	6,31	15,2	8,4	0,660

Обозначения. ГНС — газонасыщение при атмосферном давлении: температура $t = 860$ °С, выдержка $\tau = 1,25$ ч.
ВО — вакуумный отжиг: $t = 750$ °С, $\tau = 1$ ч; p — давление в печи, Па.

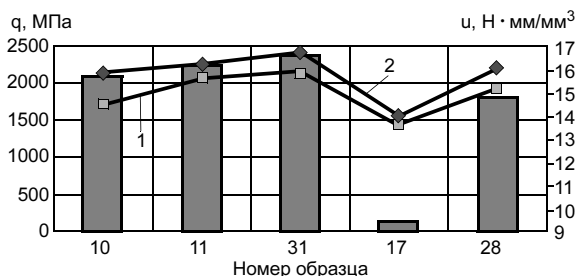


Рис. 5. Зависимость показателя несущей способности q поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТЗ-1 от технологических факторов u (столбцы), q_y (1) и $q_{1,1}$ (2)

Таблица 3

Номер образца	Состояние поверхности (режим ГНС — см. табл. 2)
10	См. табл. 2
11	См. табл. 2
31	ГНС + АВ ($P_y = 100$ Н, $P_{сф} = 1,5$ мм)
17	ГНС + АВ ($P_y = 200$ Н, $P_{сф} = 1,5$ мм)
28	ГНС + АВ ($P_y = 200$ Н, $P_{сф} = 2,5$ мм)

ле 200 Н происходит разупрочнение. Снижение степени деформации при выглаживании ($R_{сф} = 2,5$ мм, образец № 28) с силой 200 Н приводит к значительно меньшей степени разупрочнения поверхности.

ВЫВОД

Рассмотренный метод в отличие от других способов механических испытаний позволяет эффективно оценить влияние комплексного технологического воздействия на периферийные слои материала и предопределить несущую способность детали в реальных условиях ее эксплуатации, а также поведение материала при его упругопластическом деформировании.

Л. В. АГАМИРОВ, д-р техн. наук, В. Л. АГАМИРОВ, инж.

"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

О едином подходе к оценке характеристик механических свойств при статических и циклических испытаниях

В настоящее время существуют различные подходы к анализу результатов механических испытаний и оценке параметров распределений и статических зависимостей. К числу наиболее распространенных относятся методы максимального правдоподобия (ММП) и наименьших квадратов (МНК) [1]. В простых задачах (нормальное распределение случайных величин, нецензурированные выборки и т. п.) данные методы позволяют получать близкие, иногда совпадающие результаты. В то же время между ними существует значительная разница, анализ которой не является предметом настоящей статьи. Применительно к задачам механических испытаний в линейной постановке универсальные подходы в большей степени демонстрирует МНК, основанный на единой системе матричных уравнений, которые легко реализуются, например с помощью распространенных математических пакетов (Mathcad, Matlab и др.). Цель данной работы — разработка методики оценки характеристик механических свойств при прямых и косвенных механических испытаниях на базе единого подхода МНК.

В соответствии с МНК параметры линейной модели [1, 2]

$$y = Xb + \varepsilon \quad (1)$$

оценивают путем минимизации скалярной суммы квадратов по компонентам вектора b :

$$S = (y - Xb)^T V^{-1} (y - Xb), \quad (2)$$

где y — вектор-столбец наблюдений размерности n , X — матрица размерности $n \times k_1$ известных коэффициентов ($n > k_1$), b — вектор-столбец параметров размерности k_1 , ε — вектор-столбец случайных "ошибок" размерности n с нулевым математическим ожиданием и матрицей рассеяния размерности $n \times n$:

$$D(\varepsilon) = \sigma^2 V. \quad (3)$$

Дифференцируя выражение (2), определяем вектор МНК-оценок:

$$\hat{b} = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} y. \quad (4)$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Булычев С. И., Алехин В. П., Терновский А. П. Об определении физико-механических свойств материалов методом непрерывного вдавливания индентора // Физика и химия обработки материалов. 1976. № 2. С. 58—64.
2. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением / Л. А. Хворостухин, С. В. Шишкин, А. П. Ковалев, Р. А. Ишмаков. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.
3. Лурье А. И. Пространственные задачи теории упругости. М.: Гостехтеориздат, 1955.
4. Томсен Э., Янг Ч., Кобаяши Ш. Механика пластических деформаций при обработке металлов. М.: Машиностроение, 1968. 504 с.

Матрицу рассеяния оценок b определяли из уравнения

$$D(\hat{b}) = \sigma^2 (X^T V^{-1} X)^{-1}, \quad (5)$$

где несмещенная оценка для остаточной дисперсии σ^2

$$\hat{\sigma}^2 = s^2 = \frac{1}{n - k_1} (y - X\hat{b})^T V^{-1} (y - X\hat{b}). \quad (6)$$

При *прямых испытаниях*, к которым относят испытания, связанные с непосредственным измерением случайных величин, уравнение (4) позволяет оценивать *параметры сдвига и масштаба* исходя из порядковых статистик, т. е. выборочных наблюдений, упорядоченных по величине. Пусть y_i — порядковые статистики, а a и σ — параметры сдвига и масштаба соответственно (необязательно среднее и стандартное отклонения). Пусть

$$z_i = \frac{y_i - a}{\sigma}, \quad i = 1 \dots n, \quad (7)$$

$$M(z) = \alpha, \quad D(z) = V, \quad (8)$$

где a — вектор-столбец размерности n математических ожиданий, V — ковариационная матрица размерности $n \times n$ нормированных порядковых статистик. Поскольку z нормировано соотношением (7), то α и V не зависят от параметров a , σ . Так как

$$M(y) = aE + \sigma\alpha, \quad (9)$$

где E — вектор из единиц размерности n , матрица X размерности $n \times 2$ будет иметь вид

$$X = \begin{bmatrix} 1 & \alpha_1 \\ 1 & \alpha_2 \\ 1 & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot \\ 1 & \alpha_n \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Оценки параметров сдвига и масштаба на основании выражения (4) равны:

$$\hat{b} = \begin{pmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\sigma} \end{pmatrix} = (X^T V^{-1} X)^{-1} X^T V^{-1} y. \quad (11)$$

Матрица рассеяния оценок параметров сдвига и масштаба на основании выражения (5)

$$D(\hat{b}) = D \begin{pmatrix} \hat{\alpha} \\ \hat{\sigma} \end{pmatrix} = \sigma^2 (X^T V^{-1} X)^{-1}. \quad (12)$$

Вектор математических ожиданий α и ковариационную матрицу V нормированных порядковых статистик определяют из уравнений работ [1, 2]:

$$\alpha_l = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f(x) [1 - F(x)]^{n-l} [F(x)]^{l-1} dx}{B(l, n-l+1)}, \quad (13)$$

$$V_{l,l} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x^2 f(x) [1 - F(x)]^{n-l} [F(x)]^{l-1} dx}{B(l, n-l+1)} - \alpha_l^2, \quad (14)$$

$$V_{l,s} (l < s) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x f(x) [1 - F(x)]^{n-s} dx \int_{-\infty}^x y f(y) [F(y) - F(x)]^{s-l-1} [F(y)]^{l-1} dy}{B(l, s-l+1) B(s, n-s+1)} - \alpha_l \alpha_s, \quad (15)$$

$$B(a, b) = \frac{(b-1)!(a-1)!}{(a+b-1)!}, \quad (16)$$

где $l, s = 1 \dots n$, $f(z)$, $F(z)$ — плотность и функция нормированного непрерывного распределения с параметрами сдвига и масштаба соответственно. В работе [3] приведены программы в среде Mathcad для расчета математических ожиданий и ковариаций порядковых статистик на основе разложения в ряд (порядок разложения $(n+2)^{-3}$) для нормального распределения и распределения Вейбулла—Гнеденко.

При двухпараметрическом логарифмически нормальном и нормальном распределении $f(z) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{z^2}{2}}$,

$F(z) = \int_{-\infty}^z f(t) dt$. Для приведения распределения Вейбулла—Гнеденко к виду с параметрами сдвига и масштаба осуществляют следующее нормирующее преобразование:

$$\ln(x - x_0) = a + z_{\sigma}, \quad \sigma = 1/b, \quad a = \ln c, \quad (17)$$

$$F(z) = 1 - e^{-e^z}, \quad f(z) = e^{z-e^z}. \quad (17)$$

В случае логарифмически нормального распределения и распределения Вейбулла—Гнеденко в уравнения вместо y следует подставлять величину $y = \ln(x - x_0)$, предварительно вычислив независимую оценку порогового значения x_0 или считая $x_0 = 0$.

Для однократно цензурированной справа выборки типа II оценки параметров сдвига и масштаба их ковариационную матрицу определяют по тем же формулам, но при этом матрица X , вектор наблюдений y , ковариационная матрица V составляются по первым k наблюдениям случайной величины из n объектов, подвергшихся испытанию. При этом в формулах величина суммарного объема испытаний n остается неизменной.

При оценке параметров уравнений кривых усталости их необходимо привести к линейному виду в соответствии с общей линейной моделью (1):

$$\text{при использовании уравнения кривой усталости} \quad \sigma_a = \sigma_{-1} + a(N)^{-\alpha} \quad (18)$$

$$x = \lg(\sigma_a - \sigma_{-1}), \quad y = \lg N, \quad b_1 = b_2 \bar{x} - b_2 \lg a, \quad b_2 = -\frac{1}{\alpha}; \quad (19)$$

$$\text{степенного уравнения} \quad \sigma_a^r N = d \quad (20)$$

$$x = \lg \sigma_a, \quad y = \lg N, \quad b_1 = b_2 \bar{x} + \lg d, \quad b_2 = -r; \quad (21)$$

$$\text{уравнения кривой усталости [4]} \quad \sigma_a = \sigma_{-1} + c(\lg N)^{-\beta} \quad (22)$$

$$x = \lg(\sigma_a - \sigma_{-1}), \quad y = \lg \lg N, \quad b_1 = b_2 \bar{x} - b_2 \lg c, \quad b_2 = -\frac{1}{\beta}, \quad (23)$$

где σ_{-1} , a , α , r , β , c , d — параметры кривых усталости.

Условимся в дальнейшем оценивать только два параметра уравнения кривой усталости, а третий параметр σ_{-1} — предел неограниченной выносливости — если он существует, определять как независимую оценку минимизацией квадратичной формы (2), вычисляя на каждом шаге минимизации параметры b (4). Как показывают расчеты [3, 4], прямая оценка параметра σ_{-1} возможна лишь при весьма больших объемах усталостных испытаний. В соответствии с методом наименьших квадратов вектор-столбец b параметров имеет размерность 2, вектор-столбец наблюдений y имеет размерность m (m — число уравнений амплитуд напряжений циклов при усталостных испытаниях) и представляет собой некоторую функцию долговечности $y = f(N)$, т. е. зависимую случайную величину. Матрица факторов независимой случайной величины X имеет размерность $m \times 2$ и представляет собой некоторую функцию амплитуды напряжения цикла при усталостных испытаниях $X = \varphi(\sigma_a)$.

Предполагается, что случайная величина y имеет нормальное распределение на каждом уровне x с параметрами $M\{y\}$, $D\{y\}$. Нормальность распределения y должна предварительно проверяться по одному из критериев согласия. Оценки параметров распределения y определяют методом максимального правдоподобия или МНК. Так, например, в полной выборке:

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{i,j}}{n_i}, \quad \hat{\sigma}_{y_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (y_{i,j} - \hat{y}_i)^2}{n_i - 1}, \quad (24)$$

где n_i — объем испытаний на i -м уровне амплитуды напряжения цикла, $y_{i,j}$ — j -е наблюдение i -го уровня. Очевидно, что первый столбец матрицы X состоит из единиц. Второй столбец матрицы рекомендуется подвергать ортогональному преобразованию, приводящему к стати-

стической независимости оценок параметров линейной модели:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_1 - \bar{x} \\ 1 & x_2 - \bar{x} \\ \cdot & \cdot \\ 1 & x_m - \bar{x} \end{bmatrix}. \quad (25)$$

Матрица V представляет собой диагональную матрицу размерности $m \times m$ дисперсий оценок случайной величины $y - D\{\hat{y}_i\}$ для каждого уровня x , т. е. определяет вес данного уровня амплитуд напряжений циклов. Для медианной кривой усталости, т. е. кривой усталости, соответствующей вероятности $p = 0,5$, и полной выборки эта дисперсия по теореме о дисперсии выборочного среднего

$$V_{i,i} = D\{\hat{y}_i\} = \frac{\sigma_0^2 h(x_i)}{n_i} = \frac{\sigma_{yi}^2}{n_i}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (26)$$

где σ_{yi}^2 — генеральная дисперсия случайной величины y на данном уровне x , равная $\sigma_0^2 h(x_i)$. Для квантильной кривой усталости, т. е. кривой усталости, соответствующей заданной вероятности p и цензурированной выборки, эта дисперсия может быть определена приближенно как дисперсия квантиля нормального распределения по теореме о линейной функции нескольких переменных:

$$V_{pi,i} = D\{\hat{y}_{pi}\} = D\{\hat{y}_i + z_p \hat{\sigma}_{yi}\} \approx \frac{\sigma_{yi}^2}{n_i} (v_{1,1i} + 2z_p v_{1,2i} + z_p^2 v_{2,2i}), \quad i = 1, \dots, m, \quad (27)$$

где z_p — квантиль нормированного нормального распределения; v — ковариационная матрица оценок $\hat{y}_i, \hat{\sigma}_{yi}$. В полной выборке $v_{1,1} = 1, v_{1,2} = 0, v_{2,2} = 0,5$. При единичном испытании или малом числе наблюдений на данном уровне амплитуды напряжений циклов в первом приближении можно принять $V_{pi,i} = 1$, считая равновесными все уровни.

Оценки параметров линейной модели (1) для медианной

$$\hat{b}(\hat{\sigma}_{-1}) = [X(\hat{\sigma}_{-1})^T V^{-1} X(\hat{\sigma}_{-1})]^{-1} X(\hat{\sigma}_{-1})^T V^{-1} \hat{y} \quad (28)$$

и квантильной кривых усталости

$$\hat{b}(\hat{\sigma}_{-1p}) = [X(\hat{\sigma}_{-1p})^T V_p^{-1} X(\hat{\sigma}_{-1p})]^{-1} X(\hat{\sigma}_{-1p})^T V_p^{-1} \hat{y}_p, \quad (29)$$

где $\hat{y}_{pi} = \hat{y}_i + z_p \hat{\sigma}_{yi}$.

Далее все соотношения будут записаны для квантильных кривых усталости как наиболее общих, медианные же уравнения получаются из квантильных как частный случай для $p = 0,5$. Как указывалось, оценку предела неограниченной выносливости для тех уравнений кривых усталости, в которых он используется как параметр, производили минимизацией скалярной суммы квадратов:

$$S(\hat{\sigma}_{-1p}) = \{\hat{y}_p - X(\hat{\sigma}_{-1p})\hat{b}(\hat{\sigma}_{-1p})\}^T \times V_p^{-1} \{\hat{y}_p - X(\hat{\sigma}_{-1p})\hat{b}(\hat{\sigma}_{-1p})\} \quad (30)$$

по параметру σ_{-1} или σ_{-1p} с вычислением на каждом шаге оценок по формулам (28) или (29). Для уравнений кривых усталости, в которых предел неограниченной выносливости отсутствует, т. е. для двухпараметрических уравнений, оценки (28) или (29) являются окончательными и не зависят от параметра. Величина \bar{x} в уравнении (25) определяется как средневзвешенная величина по всем значениям x с учетом веса каждого уровня:

$$\bar{x}(\hat{\sigma}_{-1p}) = \frac{X(\hat{\sigma}_{-1p})^T V_p^{-1} e}{e^T V_p^{-1} e}, \quad (31)$$

где e — единичный вектор размерности m .

Линейность модели проверяют после расчета всех оценок на основании F -критерия вычислением дисперсионного отношения:

$$F = s_2^2 / s_1^2, \quad (32)$$

где дисперсия вокруг эмпирической линии

$$s_2^2 = \frac{S(\hat{\sigma}_{-1p})}{m-2}, \quad (33)$$

внутрисистемная дисперсия

$$s_1^2 = \frac{ss^T V_p^{-1} e}{n-m}; \quad (34)$$

ss — вектор размерности m оценок условных дисперсий $\hat{\sigma}_{yi}^2$ величины y на данном уровне x .

Гипотеза о линейности модели принимается, если расчетное значение выражения (32) не превышает критического, вычисленного для уровня значимости α и чисел степеней свободы $f_1 = n - m, f_2 = m - 2$:

$$F \leq F_\alpha(f_1, f_2), \quad (35)$$

где n — суммарный объем испытаний по всем уровням амплитуд напряжений циклов. В этом случае дисперсии объединяют в общую оценку:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{s_1^2 f_1 + s_2^2 f_2}{f_1 + f_2}, \quad (36)$$

являющуюся оценкой параметра σ_0^2 в уравнении (26).

Ковариационную матрицу оценок параметров b линейной модели вычисляют по уравнению (5):

$$D(\hat{b}) \approx \hat{\sigma}_0^2 [X(\hat{\sigma}_{-1p})^T V_p^{-1} X(\hat{\sigma}_{-1p})]^{-1}. \quad (37)$$

Матрица (37) из-за преобразования (25) является диагональной, что доказывает некоррелированность оценок параметров линейной модели при условии независимости оценки третьего параметра σ_{-1p} . Оценки параметров кривых усталости пересчитываются на основании уравнений (18)—(23), однако они уже не будут некоррелированными.

Параметры уравнения кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР) оценивают аналогично.

Возьмем для примера следующие уравнения кинетической диаграммы усталостного разрушения (КДУР):

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^q \text{ — уравнение Пэррисса,} \quad (38)$$

$$\frac{da}{dN} = C \left[\frac{K_{\max} - K_{th}}{K_c - K_{\max}} \right]^q \text{ — уравнение Яремы,} \quad (39)$$

$$\frac{da}{dN} = C \left[\frac{\Delta K - K_{th}}{K_c - K_{\max}} \right]^q \text{ — уравнение Приддла.} \quad (40)$$

Уравнения КДУР необходимо привести к линейному виду в соответствии с общей линейной моделью. Так же, как и при оценке параметров кривых усталости, условимся в дальнейшем оценивать только два параметра уравнения КДУР, а "нелинейные" параметры (например, K_{th}), если они имеются, определять как независимую оценку минимизацией квадратичной формы (2) с вычислением на каждом шаге этих параметров. Предполагается, что случайная величина u имеет нормальное распределение на каждом уровне x с параметрами $M\{y\}$, $D\{y\}$. Нормальность распределения u необходимо предварительно проверить по одному из критериев согласия. Оценки параметров распределения u определяют методом максимального правдоподобия или методом наименьших квадратов в том случае, если имеется не менее 5—10 наблюдений скоростей роста трещин при фиксированных значениях ΔK или K_{\max} :

$$\hat{y}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} y_{i,j}}{n_i}, \quad \hat{\sigma}_{y_i}^2 = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} (y_{i,j} - \hat{y}_i)^2}{n_i - 1}, \quad (41)$$

где n_i — объем испытаний на i -м уровне ΔK или K_{\max} , $y_{i,j}$ — j -е наблюдение i -го уровня. При единичных наблюдениях u проверку нормальности не производят.

Матрицу X определяют по уравнению (25). Линеаризация уравнений КДУР приводит к следующим соотношениям:

$$x = \lg(\Delta K), y = \lg \frac{da}{dN}, b_1 = \lg C + \bar{x} q, b_2 = q \quad (42)$$

при использовании уравнения (38);

$$x = \lg \left(\frac{K_{\max} - K_{th}}{K_c - K_{\max}} \right), y = \lg \frac{da}{dN}, b_1 = \lg C + \bar{x} q, b_2 = q \quad (43)$$

при использовании уравнения (39);

$$x = \lg \left(\frac{\Delta K - K_{th}}{K_c - K_{\max}} \right), y = \lg \frac{da}{dN}, b_1 = \lg C + \bar{x} q, b_2 = q \quad (44)$$

при использовании уравнения (40).

Матрица V в указанных уравнениях при неединичных наблюдениях u представляет собой диагональную матрицу размерности $m \times m$ дисперсий оценок случайной величины $u - D\{\hat{y}_i\}$ для каждого уровня x , т. е. определяет вес данного уровня x . Эту дисперсию определяют по уравнению (26), где $\sigma_{y_i}^2$ — генеральная дисперсия случайной величины u на данном уровне x , которая в первом приближении может быть заменена ее оценкой (41). При единич-

ных наблюдениях u на каждом уровне x матрицей V в уравнениях можно пренебречь или считать ее единичной.

В соответствии с МНК оценки параметров уравнения КДУР определяют по уравнению (4). Как указывалось, оценку других параметров КДУР для тех уравнений, в которых они имеются, производят минимизацией скалярной суммы квадратов S по параметру K_{th} или K_c с вычислением на каждом шаге оценок. Для двухпараметрических уравнений КДУР эти оценки являются окончательными и не зависят от параметра. Величина \bar{x} определяется как средневзвешенная по всем значениям x с учетом веса каждого уровня:

$$\bar{x} = \frac{\tilde{X}^T V^{-1} e}{e^T V^{-1} e}, \quad (45)$$

где e — единичный вектор размерности m .

Линейность модели проверяется после расчета всех оценок на основании F -критерия вычислением дисперсионного отношения (32), где дисперсия вокруг эмпирической линии регрессии

$$s_2^2 = \frac{S}{m - 2}; \quad (46)$$

внутрисистемная дисперсия

$$s_1^2 = \frac{ss^T V^{-1} e}{N - m}; \quad (47)$$

ss — вектор размерности m оценок условных дисперсий $\hat{\sigma}_{y_i}^2$ величины u на данном уровне x ; N — суммарный объем наблюдений скоростей роста трещин.

При выполнении неравенства (35) дисперсии объединяют в общую оценку (36). При единичных наблюдениях внутрисистемную дисперсию заменяют выборочной дисперсией вектора u с числом степеней свободы $f_1 = m - 1$:

$$s_1^2 = s_y^2.$$

Величина оценки дисперсии (36) может служить критерием предпочтения того или иного уравнения КДУР (чем меньше эта оценка, тем ближе опытные данные выбранному теоретическому уравнению), а также более точным критерием минимизации при оценке параметров K_{th} , K_c и т. п., нелинейно входящих в уравнения КДУР.

Ковариационную матрицу оценок параметров b линейной модели вычисляют по уравнению

$$D(\hat{b}) \approx \hat{\sigma}_0^2 [X^T V^{-1} X]^{-1}. \quad (48)$$

Оценки параметров уравнений КДУР пересчитывают на основании уравнений (42)—(44), однако они уже не будут некоррелированными.

Верхние \hat{y}_{pu} и нижние \hat{y}_{pl} доверительные границы [3, 4] для квантиля случайной величины u в двухпараметрической линейной модели определяют из уравнений

$$\hat{y}_{pu} = \hat{y}(x_0) + t_{\beta} [\Delta, f] \delta\{\hat{y}\}, \quad (49)$$

$$\hat{y}_{pl} = \hat{y}(x_0) + t_{1-\beta} [\Delta, f] \delta\{\hat{y}\}, \quad (50)$$

где оценка условного математического ожидания u на заданном уровне x_0

$$\hat{y}(x_0) = (X_0)^T \hat{b} = \hat{b}_1 + \hat{b}_2 (x_0 - \bar{x}), \quad (51)$$

а ее дисперсия на заданном уровне x_0 определяется из уравнения

$$\delta^2\{\hat{y}\} = (X_0)^T D(\hat{b})(X_0) = D(\hat{b}_1) + D(\hat{b}_2)(x_0 - \bar{x})^2, \quad (52)$$

где $t_{\beta}[\Delta, f]$ — квантиль уровня β нецентрального распределения Стьюдента с параметром нецентральности Δ , равным $z_p \frac{\hat{\sigma}_y(x_0)}{\delta\{\hat{y}\}}$, и числом степеней свободы $f = N - k_1$ (k_1 — число оцениваемых параметров линейной модели — в нашем случае 2). Значение квантиля нецентрального распределения может быть определено по приближенному уравнению [3, 4]. Оценку $\hat{\sigma}_y(x_0) = \hat{\sigma}_0 h(x_0)$ вычисляют графически или аналитически для конкретного значения x_0 , если условная дисперсия y изменяется по уровням (это изменение определяется эмпирической функцией $h(x_0)$). При постоянной дисперсии, а также единичных наблюдениях принимают $h(x_0) = 1$.

Рассмотренная методика оценки параметров носит обобщенный характер и может использоваться для более сложных видов линейной модели с произвольным числом параметров b и регрессоров x . Модель должна быть линейна относительно этих параметров, но не обязана быть линейной относительно x . Изменению подвергнется лишь матрица факторов в соответствии с принятым видом линейной модели.

Пример. На рис. 1 приведены логарифмы $\lg da/dN$ скоростей роста трещины, полученные при циклических испытаниях плоских образцов из сплава 15Х2НМФА-А. Необходимо произвести статистический анализ данных на основе уравнения КДУР Пэриса (38).

Применяя линеаризацию (42) и составляя матрицу X ($x = \lg(\Delta K)$) и вектор $y = \lg \frac{da}{dN}$, получим следующие оценки параметров:

$$m = 80; \bar{x} = 1,339; s_y^2 = 0,339; b_1 = -7,609; b_2 = 3,165; C = 10^{b_1 - b_2 \bar{x}} = 1,421 \cdot 10^{-12}; n = b_2 = 3,165.$$

Оценка остаточной дисперсии

$$\hat{\sigma}^2 = s^2 = \frac{1}{m-2} (y - X\hat{b})^T (y - X\hat{b}) = 0,0167.$$

Статистика критерия Фишера

$$F = s_2^2 / s_1^2 = s^2 / s_y^2 = 0,0167 / 0,339 = 0,049$$

при критическом значении $F_{0,95}(78,79) = 1,456$, что подтверждает линейность принятой модели КДУР. Объединенная оценка дисперсии равна $\hat{\sigma}_0^2 = 0,423$.

На рис. 1 приведены экспериментальные данные (отмеченные крестиками) и эмпирическая КДУР, полученная по результатам статистической обработки. Там же построены 95 %-ные доверительные интервалы для квантиля уровня 0,5. Как видно, наблюдается систематическое отклонение от теоретической прямой линии в нижней части диаграммы, а также довольно существенное выпадение экспериментальных точек за пределы доверительного интервала. Для улучшения соответствия экспериментальных и теоретических данных введем пороговое значение в уравнение кинетической диаграммы усталостного разрушения, т. е. примем $x = \lg(\Delta K - K_0)$ и

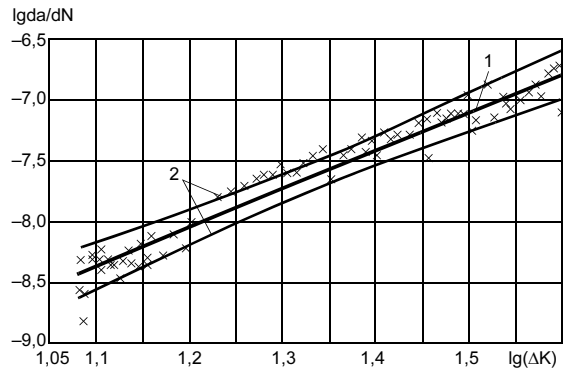


Рис. 1. Эмпирическая кинетическая диаграмма усталостного разрушения (прямая 1) и экспериментальные данные (крестики) на основе уравнения Пэриса без порогового значения, а также 95 %-ные доверительные границы (кривая 2) для квантиля уровня 0,5

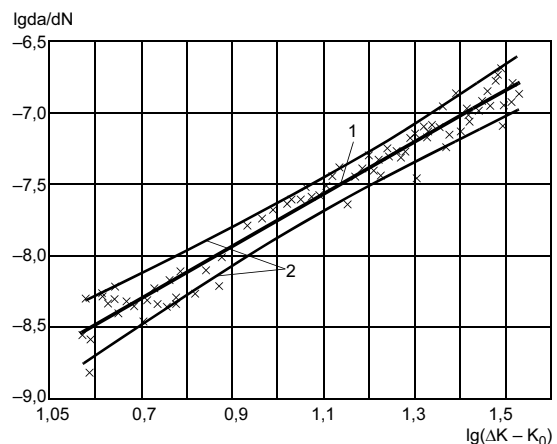


Рис. 2. Эмпирическая кинетическая диаграмма усталостного разрушения (прямая 1) и экспериментальные данные (крестики) на основе уравнения Пэриса с пороговым значением, а также 95 %-ные доверительные границы (кривая 2) для квантиля уровня 0,5

произведем оценку параметра K_0 в соответствии с указанной методикой. При расчетах получили следующие значения оценок параметров: $C = 2,643 \cdot 10^{-10}$; $n = 1,812$; $K_0 = 8,325$; $\hat{\sigma}^2 = 0,012$; $\hat{\sigma}_0^2 = 0,420$; $F = 0,036$. На рис. 2 приведены экспериментальные данные (отмеченные крестиками) и эмпирическая КДУР, полученная по результатам статистической обработки. Там же построены 95 %-ные доверительные интервалы для квантиля уровня 0,5. Как видно, соответствие экспериментальных и теоретических данных повышается.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Теория распределений. М.: Наука, 1966.
2. Кендалл М. Дж., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М.: Наука, 1973. 899 с.
3. Агамиров Л. В. Методы статистического анализа механических испытаний. М.: Интермет Инжиниринг, 2004. 127 с.
4. Степнов М. Н., Агамиров Л. В. Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Планирование и статистическая обработка результатов статических испытаний и испытаний на усталость. Методические указания. РД 50-705—91. М.: Издательство стандартов. 1991. 167 с.

Ю. О. БАХВАЛОВ, канд. техн. наук (ГКНПЦ им. М. В. Хруничева), Л. В. АГАМИРОВ, д-р техн. наук ("МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского)

Моделирование напряженно-деформированного состояния интегрированных элементов конструкции ракеты-носителя

В данной работе на основе анализа нагружения головного обтекателя (ГО) ракеты-носителя при его наземной эксплуатации и в полете установлено, что различные элементы конструкции ГО испытывают максимальные нагрузки.

Несущие слои трехслойных оболочек ГО выполнены из углепластика. Кроме того, в конструкции ГО имеются силовые элементы, выполненные из металлических материалов.

Расчетные случаи, экстремальные для прочности и несущей способности всех основных силовых элементов конструкции ГО, приведены в табл. 1.

Для остальных случаев наземной эксплуатации и полета уровни нагружения элементов конструкции ГО более низкие.

Уточненные расчеты ГО проводили с помощью метода конечных эле-

ментов с использованием системы MSC/NASTRAN. Тестовые расчеты сопоставляли с полученными аналитическими решениями.

Трехслойные обечайки ГО моделировали с применением оболочечных трехслойных элементов QUAD4, шпангоуты — с применением балочных элементов BAR. По окружности каждую створку разбивали на 40 элементов. Всего в модели более 9000 элементов. Общий вид расчетной модели приведен на рис. 1.

Расчетная модель ГО состоит из двух частей, соответствующих створкам ГО. Расположение узлов модели точно соответствует расположению замков продольного (по длине) и поперечного (по окружности) стыков. Створки ГО расчетной модели соединяли путем введения ограничений на взаимные перемещения пар узлов,

совпадающих с замками продольного стыка. Замки поперечного стыка моделировали закреплением соответствующих узлов модели.

Для ряда расчетных случаев, в которых на ГО действуют инерционные силы (№ 1, 4), а также динамических расчетов необходима массово-инерционная модель ГО [1, 2]. Ее строили путем задания плотностей материалов силовых конструкций ГО. Массу несилочных конструкций учитывали с помощью увеличения плотности заполнителя трехслойных обечаек [3].

Сравнение массово-инерционных характеристик ГО, рассчитанных с применением модели и характеристик, полученных путем измерений, приведено в табл. 2. Видно, что различие массово-инерционных характеристик не превышает 21 %.

Расчет устойчивости обтекателя проводили для расчетного случая А (сжатие) при комбинации максимального внешнего аэродинамического давления (угол атаки $\alpha = 8^\circ$) и минимального внутреннего давления $p^p = 0,0064$ МПа. Усилия толкателей при расчете не учитывали [4, 5]. При этом интегральные нагрузки в плоскости поперечного разреза следующие: $M^p = 3453$ кН·м; $N^p = 446,4$ кН; $Q^p = 479,2$ кН.

Проводили расчет двух вариантов (рис. 2):

- плоскость приложения нагрузки совпадает с плоскостью I—III;
- плоскость приложения нагрузки совпадает с плоскостью II—IV.

Таблица 1

Номер по порядку	Расчетный случай	Описание	Коэффициент безопасности
1	Транспортировка КГЧ по ТП	Квазистатическое нагружение при транспортировке КГЧ	1,5
2	M = 1	Аэродинамическое нагружение при полете в трансзвуковом режиме $t = 40,57 \div 46,64$ с	1,3
3	A	Аэродинамическое нагружение при прохождении максимума скоростного напора $t = 58,67$ с	
4	Сброс створок	Деформирование створки при сбросе под действием инерционных сил	

Таблица 2

Характеристика	ГО в целом	Модель ГО	Отличие, %	Створка ГО	Модель створки	Отличие, %
Масса, кг	2650	2650	0	1344	1326	1
Координаты центра масс, м:						
X_0	0,013	0	—	-0,019	0	—
Y_0	-0,003	0	—	1,153	1,268	10
Z_0	5,612	5,678	1	5,790	5,615	3
Центральные моменты инерции, кг·м ² :						
I_{xx}	51 332	48 440	6	24 724	24 520	1
I_{yy}	51 970	48 440	7	26 866	22 260	21
I_{zz}	10 870	11 140	2	3705	3420	8

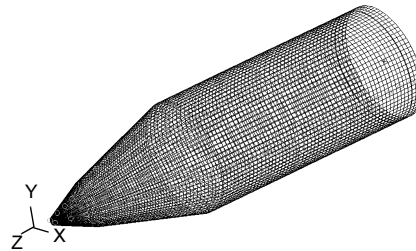


Рис. 1. Расчетная модель ГО

Форма потери устойчивости ГО для одного из случаев приведена на рис. 3.

Максимальные сжимающие напряжения в обечайках ГО формируются в случае А (сжатие) при сочетании максимального внешнего аэродинамического давления и минимального равномерного внутреннего давления. Плоскость приложения нагрузки совпадает с плоскостью II—IV.

Максимальные растягивающие напряжения в обечайках ГО и максимальные растягивающие усилия в замках поперечного разъема формируются в случае А (растяжение) при сочетании минимального внешнего аэродинамического давления с максимальным равномерным внутренним давлением. Плоскость приложения нагрузки проходит под углом 36° к плоскости II—IV. Такое положение плоскости приложения нагрузок выбрано путем предварительных расчетов для получения максимально возможных нагрузок на замки поперечного стыка. Аналогичные расчеты были проведены для всех расчетных случаев.

На следующем этапе работы рассчитывали напряженно-деформированное состояние (НДС) зоны типового фитинга поперечного и продольного разъемов. Расчет проводили с ис-

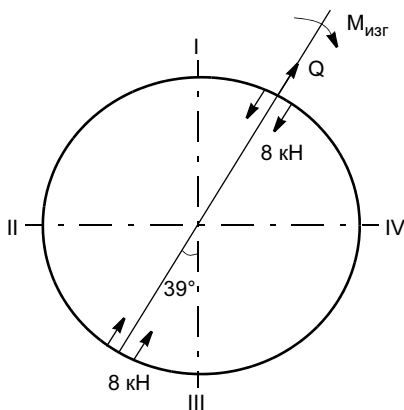


Рис. 2. Схема приложения нагрузок к переходной системе

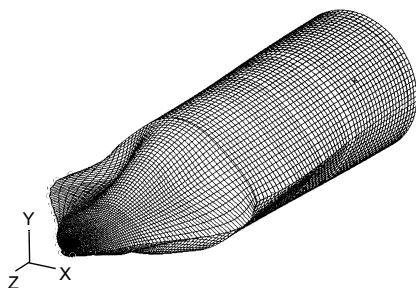


Рис. 3. Форма потери устойчивости обечайки (плоскость нагружения I—III, коэффициент запаса устойчивости $K = 2,18$)

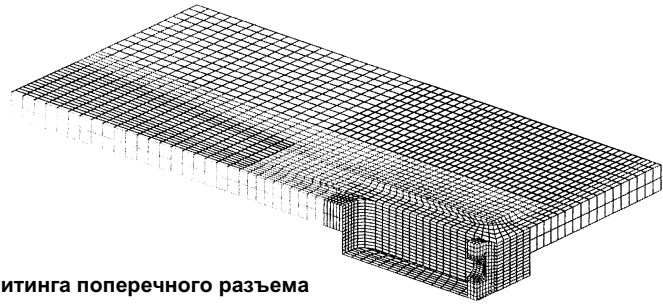


Рис. 4. Зона фитинга поперечного разъема

пользованием программного комплекса МКЭ "I-DEAS". Конечно-элементная модель соответствует конструктивно-силовой схеме типовой зоны фитинга поперечного разъема и включает типовой фитинг, участок присоединенной трехслойной обечайки с усиливающими накладками, подкрепляющий уголок и часть шпангоута.

Конечно-элементная модель зоны фитинга приведена на рис. 4.

Переднюю стенку фитинга моделировали объемными элементами, остальную часть фитинга, уголок, шпангоут и накладки — изгибными пластинами. Трехслойную обечайку моделировали следующим образом: несущие обшивки — изгибными пластинами из ортотропного материала, сотовый наполнитель — объемными элементами из ортотропного материала [6, 7].

Учитывали заливку сот под лапками фитинга и шпангоутом заливочной композицией ЗК-1. Крепление лапок фитинга к обшивке, а также уголка к фитингу моделировали элементами RIGID в местах расположения болтов. Расчетным путем определили напряжения в зоне около фитинга и самом фитинге. В результате конечно-элементного расчета определили напряжения в фитинге, подкрепляющем уголке, а также несущих обшивках и сотовом наполнителе.

Рассчитывали также зоны узла крепления толкателей, зону крепления балки узла разворота, штыри продольного и поперечного разъемов.

Переходная система включает сис-

тему разделения и конический адаптер, состоящий из металлического конического шпангоута и углепластикового конического изогридного корпуса.

Металлический шпангоут состоит из двух поясов и расположенной между ними стенки толщиной 8 мм. На верхнем поясе установлен шпангоут КА для соединения с системой разделения 1194.

Верхний пояс шпангоута адаптера и шпангоут КА соединены при помощи "башмаков", затянутых лентой, максимальная сила натяжения которой равна 3910 кг.

Нижний пояс шпангоута адаптера имеет 60 отверстий диаметром 8,5 мм для соединения с изогридным корпусом адаптера болтами М8.

Изогридный корпус представляет сетчатую композитную конструкцию высотой 909 мм, состоящую из системы спиральных и кольцевых ребер. Ребра образованы методом непрерывной намотки из композиционного материала на основе угольного волокна и связующего.

По верхнему и нижнему сечениям сетчатая конструкция имеет торцевые шпангоуты. Нижний шпангоут изогрида изготовлен методом намотки ленты, состоящей из угольного жгута.

Для восприятия сдвиговых напряжений применено трансверсальное армирование шпангоута металлическими шипами.

В табл. 3 приведены шесть расчетных случаев. Схема приложения нагрузок представлена на рис. 2,

Таблица 3

Расчетный случай	Нагрузки, действующие на переходную систему		
	Продольная сила N , кН	Изгибающий момент M , кН • м	Поперечная сила Q , кН
Транспортировка (сжатие)	56	238	136
Транспортировка (растяжение)	-56	238	136
Старт (сжатие)	224	258	98
Старт (растяжение)	28	258	98
Разделение (сжатие)	597	134	52
Разделение (растяжение)	-432	134	52

Обозначения: "+" — сжатие, "-" — растяжение.

Таблица 4

Элемент конструкции	Расчетный случай	Расчетные допускаемые напряжения, МПа	Расчетные напряжения, МПа	Коэффициент запаса
Верхний пояс шпангоута адаптера	Старт (сжатие)	350	117,7	>2
Нижний пояс шпангоута адаптера	То же	350	81,7	>2
Стенка шпангоута адаптера	" "	350	146	>2
Верхний шпангоут изогрида	" "	320	77,9	>2
Нижний шпангоут изогрида	Разделение (растяжение)	320	163,3	1,96
Спиральное ребро изогрида	Старт (сжатие)	320	215,3	1,62
Кольцевое ребро изогрида	Разделение (сжатие)	300	124,7	>2
Верхний стык изогрида (болт М8)	Разделение (растяжение)	34 130	18 500	1,88
Нижний стык изогрида (болт М10)	То же	59 430	29 400	2
Нижний стык изогрида (болт М12)	" "	82 080	14 700	>2

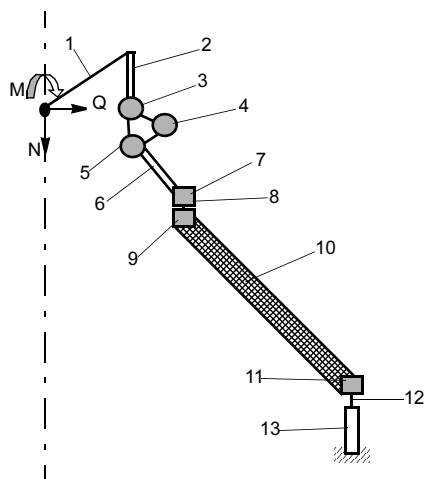


Рис. 5. Схема конечно-элементной модели адаптера: 1 — элементы RIGID; 2 — элементы THIN SHELL, имитирующие КА; 3 — элементы BEAM, имитирующие шпангоут КА; 4 — элементы BEAM, имитирующие ленту; 5 — элементы BEAM, имитирующие верхний пояс шпангоута адаптера (элементы 3—5 связаны между собой элементами RIGID); 6 — элементы THIN SHELL, имитирующие стенку шпангоута адаптера; 7 — элементы BEAM, имитирующие нижний пояс шпангоута адаптера; 8 — элементы RIGID в местах болтовых соединений или элементы GAP в остальных узлах модели; 9 — элементы BEAM, имитирующие верхний шпангоут изогрида; 10 — элементы BEAM, имитирующие изогридную сетку; 11 — элементы BEAM, имитирующие нижний шпангоут изогрида; 12 — элементы RIGID в местах болтовых соединений или элементы GAP в остальных узлах модели; 13 — элемент SOLID, имитирующий верхний шпангоут приборного отсека

коэффициенты запаса прочности для всех расчетных случаев — в табл. 4.

Расчет переходной системы в работе выполнен методом конечных элементов. Конечно-элементная модель переходной системы (рис. 5) состоит из 6098 узлов и 7184 элементов.

Шпангоут адаптера моделировали следующим образом: верхний и нижний пояса — балочные элементы BEAM, стенка — плоские элементы THIN SHELL. Все части изогридного корпуса смоделированы балочными элементами BEAM. Верхний шпангоут адаптера и шпангоут КА соединены элементами RIGID с балочным кольцом, имитирующим натяжение ленты. Между собой шпангоуты также соединены элементами RIGID.

Болтовые соединения смоделированы элементами RIGID. В болтовых соединениях максимальные усилия получены в случае "Разделение (растяжение)". При расчете на устойчивость минимальный коэффициент запаса $K = 1,81$ получен при расчетном случае "Разделение (сжатие)".

ВЫВОДЫ

1. На основании анализа нагруженности элементов конструкций многослойных силовых оболочек головного обтекателя, адаптера и шпангоута

переходной системы ракеты-носителя при их наземной эксплуатации и в полете установлены экстремальные расчетные случаи:

- транспортировка, аэродинамическое нагружение в транзвуковом режиме и при прохождении максимума скоростного напора, деформирование створок при сбросе для головного обтекателя;
- транспортировка, старт и разделение для адаптера.

2. На основании полученной расчетной модели определены напряженно-деформированное состояние и устойчивость элементов металлокомпозитных конструкций головного обтекателя (оболочек, створок, узлов разворота, замков, фитингов, толкателей, штырей поперечного и продольного разъемов), адаптера (изогридных шпангоутов, спиральных и кольцевых ребер, болтов стыков изогрида), максимальные расчетные напряжения и коэффициенты запаса для всех расчетных случаев.

3. Расчетные запасы соответствуют нормативным значениям, что подтверждено также испытаниями изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Туркин И. К. Конструкция и проектирование космических летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1986. 344с.
2. Голубев И. С., Самарин А. В. Конструкция и проектирование летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1995. 448 с.
3. Егоров В. Н. Комплекс программ KL-1 для проектирования соединений внахлест композиционных стержней и цилиндрических оболочек // Вестник машиностроения. 1996. № 5. С. 17—19.
4. Васильев В. В. Механика конструкций из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1988. 272 с.
5. Усюкин В. И. Строительная механика конструкций космической техники: Учебник. М.: Машиностроение, 1988. 392 с.
6. Бахвалов Ю. О., Кулага Е. С., Громов С. Н. Исследование конструкции клеемеханической законцовки стержня из углепластика // РК-техника. М.: НПО "Композит", 1990.
7. Бахвалов Ю. О., Кулага Е. С. Исследование деформативности клеемеханических нахлесточных соединений элементов из углепластиков // РК-техника. М.: НПО "Композит", 1990.

С. А. БОЛОНЕНКО, инж.
(ООО "Элкод", Москва),
С. А. ЗАХАРОВ, аспирант
(НИИ АО),
И. А. Овчинников, инж.
(ОАО "РПКБ", Раменское Московской обл.),
Е. Н. ПОПОВ, канд. техн. наук
("МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского)

Применение САПР Solid Works и CAE-системы Cosmos Works для компьютерных испытаний и оптимизации конструкций приборов систем управления летательных аппаратов

Во всех промышленно развитых странах проводятся интенсивные работы по автоматизации не только технологических процессов, но и процессов конструкторской и технологической подготовки производства.

В настоящее время конструкторские подразделения предприятий имеют возможность широкого выбора компьютерных программных продуктов как отечественных, так и зарубежных для автоматизации конструкторского проектирования. Подготовка производства изделий разделена на взаимосвязанные работы, осуществляемые в конструкторском бюро по созданию конструкторской документации, в отраслевых НИИ — по исследованию разрабатываемых конструкций и изысканию более эффективных решений, в технологических НИИ и на заводах — по разработке технологии, технологическому оснащению и освоению производства изделий. Выполнение этих работ связано со значительными затратами материальных и трудовых ресурсов. Снижение этих затрат в КБ достигается с помощью автоматизированных систем проектирования и конструирования (САПР), к которым относится САПР Solid Works с интегрированной CAE-системой Cosmos Works.

В данной работе приведена новая методика работы конструктора при разработке конструкций изделий на примере корпуса бесплатформенной инерциальной системы (БИНС) и трехкомпонентного лазерного чувствительного элемента (ТЛГ) с использованием базовых пакетов Solid Works и Cosmos Works. В результате реализации данной методики повысится производительность и улучшится качество труда конструктора и есть все основания ожидать значительного снижения издержек производства на натурные испытания опытных образцов разрабатываемых изделий и корректировку соответствующей конструкторской документации.

По действующей в настоящее время традиционной методике после выработки всех возможных вариантов конструкции изделия начинается этап конечного проектирования, когда ведущий конструктор выбирает наиболее подходящий вариант из числа конкурирующих, дополняет его более удачными идеями и принципами из других вариантов, проводит при необходимости корректировку общей конструкции выбранного варианта, выполняет доводку конструкций деталей изделия и в результате получает единственно правильный, по его мнению, результат. После этого производятся расчеты точностных параметров и условий собираемости.

Этап разработки чертежей наступает сразу после корректировки окончательного варианта по результатам расчетов.

Разработанная конструкторская документация поступает в опытное производство, где ведется изготовление опытной партии изделия. По результатам изготовления и испытаний опытных образцов выполняют корректировку документации. Затем следует дорогостоящий цикл опытного производства, который может повторяться несколько раз в зависимости от сложности изделия и правильности выбора технологии его изготовления.

В связи с этим поставлена задача сократить время на конструирование новой конструкции (модификации) изделия, используя программное обеспечение САПР Solid Works и CAE-системы Cosmos Works.

Solid Works — это полнофункциональное приложение для автоматизированного механико-машиностроительного конструирования, базирующегося на параметрической элементно-ориентированной методологии. Это позволяет легко получать твердотельную модель из двухмерного эскиза, применяя простые и эффективные инструменты моделирования.

Имеются широкие возможности визуализации и создания фотореалистичных изображений с использованием дополнительных источников освещения и регулированием характеристик материала (отражения или поглощения им света, излучения, прозрачности, шероховатости поверхности).

Созданные детали могут объединяться в сборку с заданием ограничений взаимного расположения любых деталей друг относительно друга (соосности, фиксации, совпадения точек и плоскостей и др.) и регулировкой характеристик каждой детали.

На основе трехмерного объекта возможно автоматическое создание чертежа изделия, состоящего из основных и вспомогательных видов, сложных разрезов и сечений. Поддержка многочисленных форматов обмена позволяет использовать любой чертежно-графический редактор. Следует отметить мощные интеграционные возможности системы, обеспечивающие интерфейс с ведущими технологическими и расчетными приложениями, а существующие средства разработки приложений позволяют стыковать прикладные системы с геометрическим ядром Solid Works. Новая генерация систем может заметно потеснить дорогостоящие интегрированные системы и существенно снизить количественную потребность их применения.

Cosmos Works является простым в использовании новым инструментом анализа напряжений, деформаций, собственных частот, прочности деталей при механических, температурных и других воздействиях. Он позволяет сократить затраты и время, необходимые для представления продуктов на рынок, путем испытания изделия на компьютере (компьютерное моделирование) вместо проведения дорогостоящих и требующих значительного времени натурных испытаний.

Предлагается следующая методика использования этих программных продуктов для разработки конструкций изделий.

После получения технического задания на проектирование компоновки ведущий конструктор анализирует его и ведет разработку конкурирующих вариантов конструкции изделия в Solid Works. Затем все варианты моделируются в Cosmos Works: проводятся компьютерные испытания (статические, температурные, вибрационные). На основе результатов моделирования выбирается базовый вариант.

Одновременно или сразу после этого этапа выделяются полезные идеи из конкурирующих вариантов. После чего базовый вариант оптимизируется на основе выделенных идей. Производится анализ оптимизированного базового варианта в Cosmos Works. Если результаты анализа удовлетворяют полностью или с отдельными незначительными недостатками, производится корректировка модели оптимизированного базового варианта и последующая компоновка изделия.

Далее выполняют проверку на собираемость средствами Solid Works (на основе расчета размерных цепей), а затем рабочие чертежи системы.

Таким образом, методика реализуется в следующей последовательности (рис. 1):

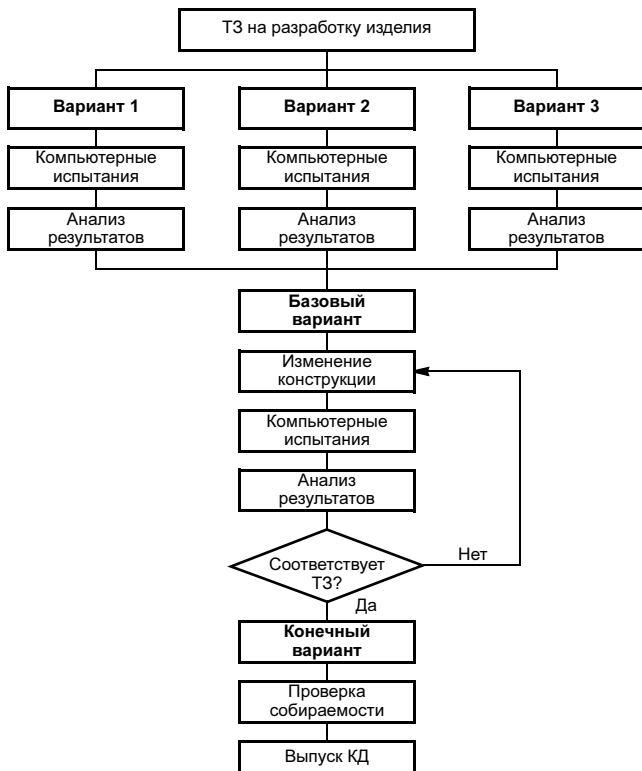


Рис. 1. Алгоритм оптимизации конструкции изделия

— разработка 3D-моделей конкурирующих вариантов конструкции изделия на основе плоских чертежей или технического задания;

— проведение компьютерных испытаний конкурирующих вариантов конструкции изделия;

— экспертный анализ полученных результатов испытаний, выбор базового варианта;

— оптимизация базового варианта конструкции;

— проведение компьютерных испытаний базовой модели изделия;

— экспертный анализ полученных результатов испытаний;

— доработка базовой конструкции изделия на основе экспертной интерпретации результатов испытаний;

— проведение компьютерных испытаний измененной базовой конструкции изделия;

— повторение трех предыдущих пунктов и выбор оптимизированной конструкции изделия;

— проверка собираемости изделия (сборки) оптимизированной конструкции;

— выпуск конструкторской документации.

Ниже приведены результаты, полученные при реализации предлагаемой методики в процессе конструирования корпуса БИНС и сборки ТЛГ. Полученные базовые конструкции изделий приведены на рис. 2 и 3.

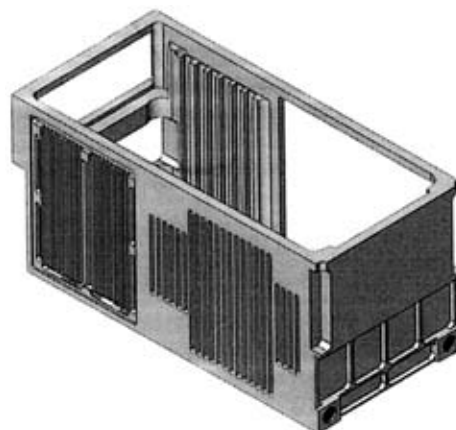


Рис. 2. Корпус БИНС

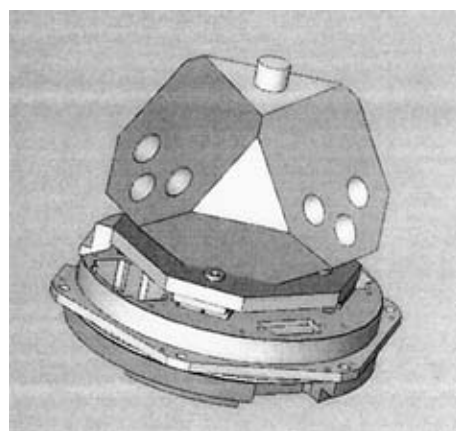


Рис. 3. Сборка ТЛГ

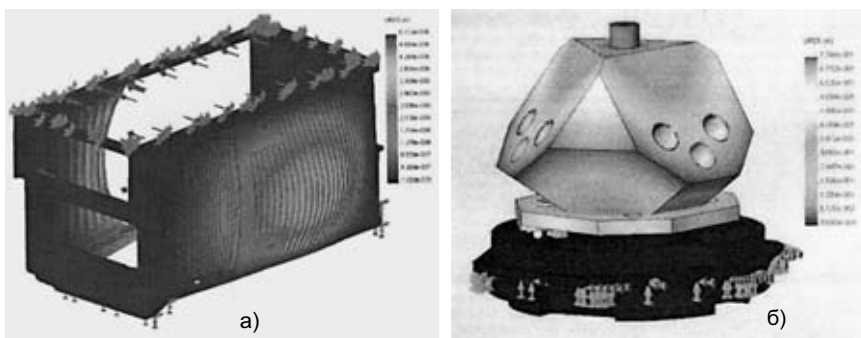


Рис. 4. Статический анализ корпуса БИНС (а) и сборки ТЛГ (б)



Рис. 6. Термический анализ корпуса БИНС

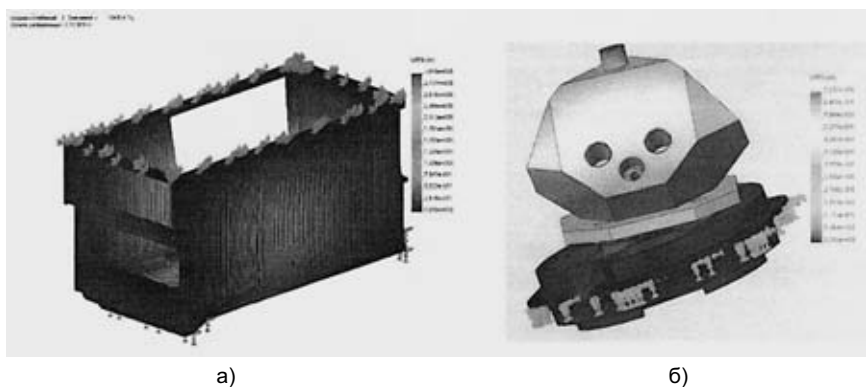


Рис. 5. Частотный анализ корпуса БИНС (а) и сборки ТЛГ (б)

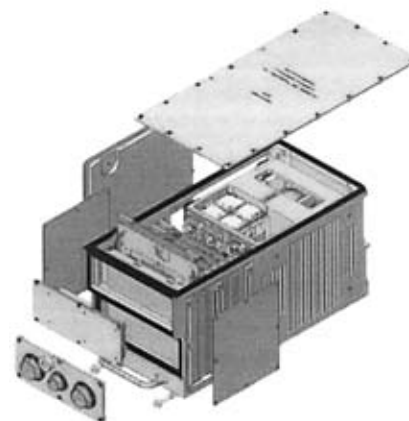
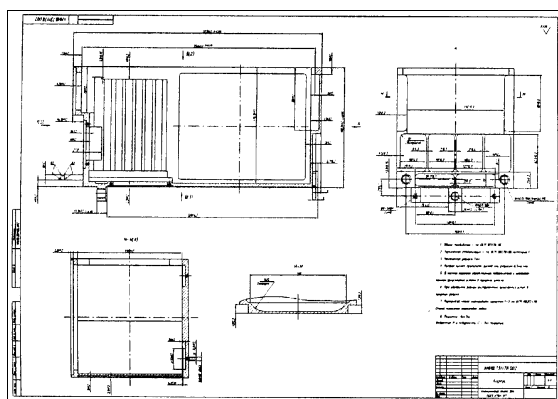
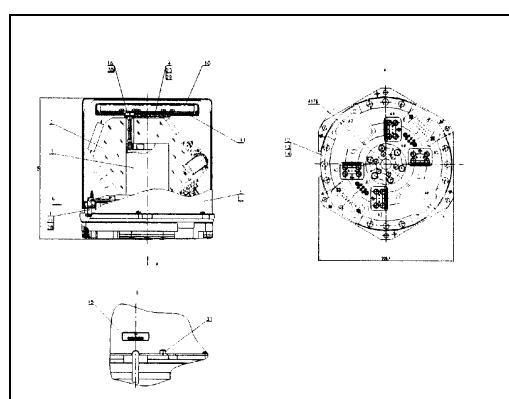


Рис. 7. Сборка БИНС



а)



б)

Рис. 8. Рабочие чертежи корпуса БИНС (а) и сборки ТЛГ (б)

Фрагменты результатов компьютерных испытаний приведены на рис.: 4 (статические испытания — определение смещений, напряжений, ответных реакций при постоянных нагрузках); 5 (частотные испытания — определение собственных частот, смещений, напряжений и ответных реакций при вибрационных нагрузках); 6 (термические испытания — определение температурного распределения при температурных воздействиях).

Проверка на собираемость приведена на рис. 7, рабочие чертежи корпуса БИНС и сборки ТЛГ — на рис. 8.

На основе экспертной интерпретации компьютерных испытаний базовых конструкций проведена оптимизация:

повышена жесткость в отдельных местах корпуса, изменено расположение радиаторов и электронных элементов и др.

Предложенная методика опробована на двух базовых предприятиях, получила одобрение и принята к внедрению.

В перспективе при более детальном рассмотрении действий конструктора и экспертов по алгоритму оптимизации возможно при дальнейших исследованиях выявить закономерности и реализовать их в виде соответствующей программы автоматизированной оптимизации.

В. А. НОВИКОВ, канд. техн. наук
("МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского),
А. Н. ЯШИН, инж.
(Поволжский центр качества, Казань)

Измерения в системах менеджмента качества организаций

Основными целями деятельности любого предприятия являются достижение лидерства в своей области рынка и получение прибыли за счет выпуска продукции, отвечающей требованиям заказчиков или превосходящей эти требования. В процессе движения к этим целям предприятие, ориентируясь на удовлетворение заказчиков, наряду с другими задачами работает над непрерывным повышением качества всех процессов жизненного цикла выпускаемой продукции или оказываемых услуг. Обобщение опыта предприятий под этим углом зрения показывает, что применение модели развития бизнеса организации на основе положений стандартов серии ИСО 9000 путем разработки, внедрения и функционирования систем качества, построенных по принципу ориентации на потребителя, наглядно продемонстрировало, что серьезное отношение руководства организации к основным постулатам системы, добросовестное выполнение стандартных требований к ней однозначно приводят к достижению заявляемых целей по улучшению бизнеса и конкурентоспособности организации.

Действующая (третья) редакция международных стандартов серии ИСО 9000:2000 [1, 2], которая устанавливает принципы и требования к системам менеджмента качества (СМК), не только сняла ограничения на модельные инварианты СМК, предоставив возможность каждой организации строить свою уникальную модель системы и тем самым максимально адаптировать общие требования к специфике организации, но и установила, что каждое действие участников (элементов) системы и их взаимоотношения как между собой, так и с внешними заинтересованными лицами, например, с поставщиками, партнерами и потребителями, следует рассматривать как процессы, к которым в том числе относятся вопросы управления организацией как управление совокупностью такого рода процессов.

С точки зрения процессного подхода организация рассматривается как совокупность взаимосвязанных и взаимозависимых элементов (подразделений, уровней руководства, документации, менеджеров и линейных сотрудников, зданий и сооружений, инженерных систем обеспечения, внешних участников собственной деятельности и т. д.) системы всеобщего менеджмента, включающей подсистему всеобщего менеджмента качества (TQM) и определяющей связи между элементами как процессы, преобразующие поступившие от других элементов системы ресурсы и управляющие воздействия в их новую совокупность с новой, более высокой ценностью. При этом построенная система взаимодействия элементов предполагает, что в СМК создана такая подсистема всесторонней оценки элементов и процессов,

включая процессы взаимодействия внутренней и внешней среды организации, разработаны и внедрены такие процедуры проверок выполнения установленных в системе правил и требований, которые позволяют постоянно совершенствовать и элементы, и процессы за счет введения системы корректирующих и предупреждающих действий, обеспечивая в результате и результативность деятельности СМК, и эффективность инвестиций в ее построение и поддержание.

Такого рода система оценки является неотъемлемым элементом любой системы управления, в том числе и управления качеством, так как чтобы управлять каким-либо объектом, прежде всего, необходимо знать его состояние, параметры, а это достигается только измерениями. Применительно к СМК можно сказать, что без количественных оценок качества обойтись нельзя, более того, проблема измерения и количественной оценки качества объектов, субъектов, процессов и связей в системе является узловой проблемой как науки о качестве, так и практики успешного бизнеса, построенного на повышении степени удовлетворенности потребителя. Поэтому вполне естественно, что из метрологии уже давно выделилось направление, связанное с количественной оценкой качества продукции, — квалиметрия. Квалиметрия развивалась и совершенствовалась в период, когда качество продукции было главной заботой предприятия в процессе завоевания рынка [1]. По мере внедрения принципов TQM в организационную и производственную деятельность центр тяжести от непосредственно качества продукции в общем менеджменте организации постепенно переходит на показатели качества системы процессов организации и взаимоотношений заинтересованных сторон, которые и определяют конечное качество продукции. Весомый вклад квалиметрия внесла в развитие нетрадиционных для метрологии экспертных методов оценки комплексных и интегрированных показателей качества объектов. Естественно, что в ходе развития конкурентного рынка в России объекты квалиметрии видоизменились. Изменились и инструменты количественной оценки качества, и средства измерений, поскольку речь идет о таких сложных объектах, как человеко-машинные системы, трудовые коллективы, системы и процессы управления и т. п.

По мнению специалистов [2], имеет место противоречие, когда, с одной стороны, законодательные требования по обеспечению единства измерений должны быть представлены в СМК в существенном объеме, а с другой — практическое полное отсутствие внимания к этим требованиям со стороны специалистов по менеджменту. В данной работе авторы попытались обратить внимание на

уже существующий набор принципов, условий, требований, нормативов и рекомендаций действующих в настоящее время нормативных правовых документов в области менеджмента качества, связанных с измерительными процессами и процедурами в СМК, продемонстрировав тем самым серьезность отношения к измерениям в TQM, системную потребность в них и тесную взаимосвязь метрологической службы предприятия и его службы качества.

Стандарты серии ИСО 9000 об измерениях в системах менеджмента качества

Для обеспечения возможности проведения упомянутого выше непрерывного и периодически повторяющегося цикла проверок в системе объективно необходимо иметь механизм постоянного сбора и анализа сведений о состоянии системы и ее процессов. В стандартах серии ИСО 9000 это достигается выполнением требования к СМК по измерению, анализу и улучшению (рис. 1).

Из приведенной на рис. 1 стандартизированной процессной модели СМК следует, что измерение, анализ и улучшение не только входят во внутренний цикл организации, взаимодействуя с соответствующими процессами жизненного цикла на входе и формируя исходный материал для высшего руководства на выходе, но и осуществляют принципиальную для данной модели функцию — оценку удовлетворенности потребителя как важнейший индикатор успешности позиционирования организации на рынке. В связи с этим трудно переоценить значимость измерительных процедур с целью получения объективных свидетельств о состоянии СМК для их последующего анализа и выработки управляющих решений для ее улучшений.

Один из основных постулатов д-ра Э. Деминга — автора модели системы качества, ориентированной на удовлетворение потребителя, отраженный в принципах международного стандарта ИСО 9000:2005, гласит, что принятие решения в системе должно основываться на фактах (объективных свидетельствах). Сложно предложить что-либо другое более значимое для сбора объективных свидетельств о состоянии элементов и процессов СМК, чем измерение, испытание, наблюдение. Именно поэтому один из основных этапов создания и внедрения СМК, а также поддержания системы в работоспособном состоянии и ее улучшения, предусматривает разработку методов для измерения результативности и эффективности. Политика организации в области качества, определяя основные ориентиры, тоже однозначно указывает, что устанавливаемые цели по качеству должны быть измеримыми. Принцип постоянного улучшения системы предусматривает использование для этой цели измерения, проверки и анализа достигнутых целей. Применение статистических методов контроля и управления качеством с целью выявления изменчивости процессов системы вообще немыслимо без измерений.

Таким образом, жизнеспособность и полезность СМК для организации во многом определяется степенью проникновения метрологических процедур в процесс функционирования системы. Для построения соответствующего "интерфейса" стандартом ИСО 9000:2005 опреде-

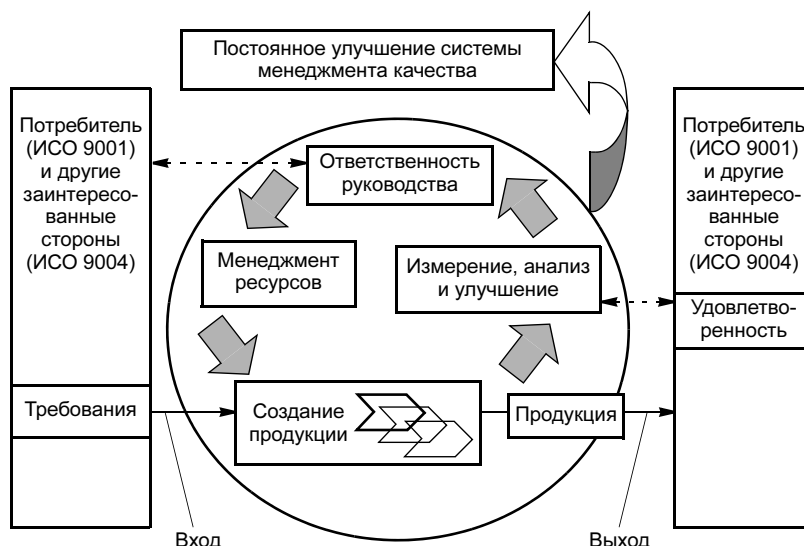


Рис. 1. Модель системы менеджмента качества, основанной на процессах (ИСО 9000:2005)

лен ряд терминов, относящихся к обеспечению качества процессов измерения. Стандарт вводит понятие системы управления измерениями как подсистемы СМК, обеспечивающей посредством метрологической службы организации достижение метрологического подтверждения характеристик измерительного оборудования и управленческие процессы измерений.

Требования, предъявляемые к СМК международным стандартом ИСО 9001:2000, не только в существенной мере уделяют внимание метрологическим аспектам и системы в целом, но и выделяют такой важнейший с точки зрения уверенности выполнения организацией ожидаемый потребителем, как управление средствами измерений, в отдельный этап жизненного цикла продукции.

Измерение, анализ и улучшение в СМК

Раздел 8 требований ИСО 9001 "Измерение, анализ и улучшение" определяет построение подсистемы мониторинга и изменений (рис. 2).

В первую очередь эта подсистема должна обеспечить в качестве одного из способов измерения работы СМК, касающегося восприятия потребителями соответствия организации их требованиям, мониторинг информации об удовлетворенности потребителей от производимой организацией продукции или выполняемыми услугами (п. 8.2.1). Высшему руководству необходимо учитывать, что в организации должны быть спланированы и установлены такие методы измерений и использования этой информации, включая источники информации, частоту сбора и анализа данных, которые позволяют результативно и эффективно учитывать мнения потребителей. Сбор такой информации может быть активным или пассивным, в зависимости от того, сколько имеется источников информации, связанной с потребителями, каков характер этих источников и их доступность.

Примеры информации, связанной с потребителями (ISO 9000—2005): информационные обзоры от потребителей и пользователей; обратная связь по перспективам обращения продукции; требования потребителей и информация по контрактам с заказчиками; данные монито-



Рис. 2. Структура и смысловое содержание требований по мониторингу и измерениям в СМК по ИСО 9000:2000 (раздел 8)

ринга о потребности рынка; отзывы о предоставленных услугах; информация о конкурентах.

Высшему руководству необходимо использовать измерение и мониторинг обратной связи об удовлетворенности потребителей как жизненно важные средства, которые обеспечивают информацию на постоянной основе, к тому же учитывают реакцию, цену и технологию поставки продукции.

Примеры источников информации об удовлетворенности потребителей: жалобы потребителей; непосредственное общение с потребителями; анкетирования и обзоры; сбор и анализ данных по субподряду; работа с целевыми группами потребителей; отчеты организаций-потребителей; сообщения в различных средствах информации; изучение отраслей промышленности и экономики.

Внутри организации информацию о соответствии выполняемых мероприятий в СМК запланированным, а также сбор данных и их предварительный анализ о функционировании и результативности СМК обеспечивает процедура внутреннего аудита (п. 8.2.2). Высшему руководству следует обеспечить разработку результативного и эффективного процесса внутреннего аудита для оценки сильных и слабых сторон системы менеджмента качества. Процесс внутреннего аудита действует как средство менеджмента при независимой оценке любого указанного процесса или вида деятельности. Он предоставляет независимый инструмент для использования при получении объективных свидетельств того, что существующие требования выполнены, так как при внутреннем аудите оценивается результативность и эффективность организации через ее СМК. Соответствующие входные данные от областей деятельности и подразделений, подлежащих аудиту, а также от других заинтересованных сторон

следует учитывать при разработке планов внутренних аудитов.

Объекты рассмотрения при внутреннем аудите: результативное и эффективное внедрение процессов; возможности постоянного улучшения; возможности процессов; результативное и эффективное применение статистических методов; использование информационных технологий; анализ данных о затратах на качество; результативное и эффективное использование ресурсов; ожидания и результаты функционирования процессов и продукции; адекватность и точность измерения деятельности; деятельность по улучшению; отношения с заинтересованными сторонами.

Наряду с оценкой независимой стороной при внутреннем аудите высшему руководству организации следует использовать проведение такого метода измерений для сбора исходных данных о состоянии СМК как самооценку. Самооценка — тщательное оценивание системы, обычно организуемое самим руководством организации, итогом которого является мнение или суждение о результативности и эффективности организации и уровне зрелости системы менеджмента качества. Самооценка может использоваться организацией для сравнения

своей деятельности с лучшими достижениями внешних организаций и показателями мирового уровня по данному виду деятельности. Она помогает при оценивании улучшения деятельности организации; если процесс внутреннего независимого аудита организации используется для получения объективных свидетельств того, что существующие политика, процедуры или требования выполнены, то самооценка направлена на установление степени улучшения системы, например, результативности и эффективности внедрения системы менеджмента качества в организации. Распространенность самооценки как метода измерения состояния системы объясняется тем, что он прост для понимания, легок при использовании, требует минимальных ресурсов руководства, обеспечивает входные данные для улучшения функционирования СМК. Вместе с тем самооценку не следует рассматривать как альтернативу внутреннему или внешнему аудиту СМК.

В соответствии с требованиями ИСО 9001:2000 организация должна наладить мониторинг и, где это целесообразно, измерение процессов СМК, а также обращаемой внутри системы продукции на всех входящих в СМК стадиях жизненного цикла.

Измерение процессов (п. 8.2.3) главным образом применяют при текущем менеджменте операций, а также оценке процессов, которые могут быть объектами для поэтапных или постоянных улучшений, при достижении организацией ее стратегических целей и даже для прорывных проектов.

Примеры измеряемых показателей процессов СМК: возможности процесса; время реагирования процесса на изменение; продолжительность цикла или производительность процесса; измеряемые аспекты надежности,

стабильности; выпуск продукции; результативность и эффективность работы сотрудников организации; применение эффективных технологий; сокращение непроизводительных расходов; распределение и сокращение затрат.

Измерение продукции (п. 8.2.4) необходимо планировать и осуществлять с целью проверки того, что требования заинтересованных сторон выполнены и используются для улучшения процессов жизненного цикла продукции. При выборе методов измерения для обеспечения соответствия продукции требованиям, а также при рассмотрении потребностей и ожиданий потребителей организации необходимо учитывать:

- виды характеристик продукции, от которых затем зависят виды измерений, подходы измерения, необходимая точность и требуемые навыки;

- необходимые оборудование, программные средства и инструменты;

- расположение подходящих точек измерения в последовательности процесса жизненного цикла продукции;

- характеристики, подлежащие измерению в каждой точке, документацию и критерии приемки, которые будут применяться;

- установленные потребителями точки для освидетельствования или верификации выбранных характеристик продукции;

- контроль или испытания в присутствии заказчика, или осуществляемые законодательными и регламентирующими полномочными органами;

- где, когда и как организация намерена (или это требуется потребителями или законодательными и регламентирующими полномочными органами) привлекать квалифицированную третью сторону для проведения испытаний типа, контроля или испытаний в ходе процесса, верификации, валидации, квалификации продукции;

- квалификацию работников, материалов, продукции, процессов и СМК;

- окончательный контроль с целью подтверждения, что деятельность по верификации и валидации завершена и одобрена;

- регистрацию результатов измерения продукции.

Организации следует анализировать методы, используемые при измерении продукции, и предусматриваемые записи по верификации, чтобы учитывать возможности улучшения деятельности.

Типичные примеры записей об измерении продукции, которые следует рассматривать при улучшении деятельности: протоколы контроля и испытаний, уведомления о выпуске материалов, бланки приемки продукции, сертификаты соответствия, если это необходимо.

Измерения в процессах жизненного цикла продукции СМК

Как известно, процесс измерения предполагает определение значений параметров объекта, в данном случае это процессы СМК, выпускаемая продукция или оказываемая услуга, затем последующую оценку точности измеренных значений и оценку их достоверности. Требования ИСО 9001:2000 к процессам жизненного цикла в СМК однозначным условием управляемости на этапе производства и обслуживания определяют наличие и применение контрольных и измерительных приборов (п. 7.5.г). Поэтому *управление устройствами для мониторинга и измерений* (п. 7.6) выделяется как самостоятельный этап жизненного цикла, к которому стандартом устанавливается

целый ряд требований, применительно к метрологической поддержке функционирования и совершенствования СМК.

Однако необходимо помнить, что требования этого раздела не являются исчерпывающими по отношению к вопросам обращения измерительного оборудования в организации, потому что в нем имеется дополнительная отсылка к требованиям ИСО 1012:2003 "Системы управления измерениями — Требования к процессу измерения и измерительному оборудованию". Кроме того, в примечаниях к русской версии стандарта ИСО 9001:2000 (ГОСТ Р ИСО 9001—2001) оговаривается, что требования раздела 7.6 применяют наряду с правилами и нормами, которые содержатся в нормативных документах по обеспечению единства измерений, имеющих обязательную силу на территории России, в соответствии с Законом РФ "Об обеспечении единства измерений". В самом же разделе 7.6 содержатся главным образом требования, связывающие управление устройствами для мониторинга и измерений с другими процессами жизненного цикла в СМК.

Например, требования по выбору объектов, методов и оборудования для мониторинга и измерения, которые планируется осуществить, необходимы для обеспечения свидетельства соответствия продукции установленным требованиям. При этом организация должна разработать процессы для подтверждения того, что назначенные способы мониторинга и измерения совместимы (соответствуют) с установленными требованиями к мониторингу и измерениям. Подчеркивается, что калибровку или поверку измерительного оборудования в установленном нормативами порядке следует проводить только тогда, когда необходимо обеспечить результаты измерений, имеющие законную силу. В этих случаях измерительное оборудование также должно быть отрегулировано, идентифицировано, защищено от регулировок, от повреждения и ухудшения состояния при обращении, техническом обслуживании и хранении.

Если обнаружено, что оборудование не соответствует требованиям, то организация должна оценить и зарегистрировать правомочность предыдущих результатов измерения и предпринять соответствующее действие как в отношении такого оборудования, так и любой измеренной с его применением продукции. Записи результатов калибровки и поверки должны поддерживаться в рабочем состоянии.

Иначе говоря, свой подход к определению места и роли измерений в процессах жизненного цикла СМК высшее руководство может сформулировать, ответив на ряд вопросов, которые возникают при анализе требований стандарта. К таким вопросам могут быть отнесены, например, следующие (ISO 9004:2000):

- как мы можем проводить мониторинг функционирования процесса (способность процесса, удовлетворенность потребителей)?

- какие измерения необходимы?

- как мы можем анализировать собранную информацию наилучшим образом (статистические методы)?

- что говорят нам результаты этого анализа?

Техническое регулирование

Измерения, обеспечение единства измерений и метрологическое обеспечение, в том числе в СМК организаций, являются областью деятельности, подпадающей под положения Федерального закона "О техническом ре-



Рис. 3. Сопоставление объектов оценки Федерального закона "О техническом регулировании" и международного стандарта ИСО 9000:2005

гулировании" (ст. 7, п. 11), т. е. являются обязательными. Более того, при всей важности других требований, предъявляемых стандартом к СМК ГОСТ Р ИСО 9001—2001, только требования к обеспечению единства измерений в соответствующей части контролируются государством в рамках государственного метрологического контроля и надзора. Именно результаты этих проверок показывают слабое внимание службы качества, а значит, и высшего руководства к поверке и калибровке средств измерений, их ремонту, аттестации испытательного оборудования и квалификации сотрудников, эксплуатирующих и обслуживающих измерительное оборудование.

Пункт 11 статьи 7 указанного закона в его новой редакции устанавливает, что Правительством РФ до дня вступления в силу технического регламента утверждается перечень национальных стандартов, содержащих правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения принятого технического регламента и осуществления оценки соответствия. В случае отсутствия указанных национальных стандартов применительно к отдельным требованиям технического регламента или объектам технического регулирования Правительством РФ утверждаются правила и методы исследований (испытаний) и измерений, в том числе правила отбора образцов, необходимые для применения и исполнения принятого технического регламента и осуществления оценки соответствия.

Очевидно, что и Федеральный закон "О техническом регулировании", и Закон РФ "Об обеспечении единства измерений" имеют в виду традиционные метрологические объекты — продукцию, процессы, говоря о правовом регулировании отношений сторон на рынке при установлении, применении, использовании и оценке соответствия объектов (продукции, процессов, работы и услуг). Применительно же к СМК такого рода объектом оценки соответствия являются процессы СМК. В соответствии с положениями ИСО 9001 оценивание соответствия СМК установленным требованиям предусматривает оценивание процессов СМК, аудит (проверку) СМК, анализ объ-

ективных свидетельств о состоянии СМК и самооценку (рис. 3). Таким образом, к классической метрологии добавляются эконометрия, социометрия, квалиметрия, экспертиза и т. п. методы оценки и измерений нетрадиционных объектов со своими инструментарием, неопределенностью, анализом результатов. Так, например, устройства для мониторинга и измерений удовлетворенности потребителя могут быть и не средствами измерения. Следовательно, в СМК смысловой характер терминов "измерительное оборудование", "контрольное оборудование", "испытательное оборудование" может быть видоизменен. Как? На этот вопрос стандарты менеджмента качества не дают прямого ответа, поэтому установление этих и подобных понятий и методик их реализации в СМК — дело самой организации, но само их наличие является и необходимостью и потребностью любой бизнес-структуры.

Например, предусматривается, что процесс контроля в СМК, в том числе измерительный контроль, осуществляется по тем же принципам, что и в метрологии, и помимо самих измерений может включать калибровку и испытание средств измерений. Да и само испытание элементов (процессов) СМК также не обходится без измерения параметров объекта испытаний, измерения условий проведения испытаний и последующей оценки точности и достоверности проведенных испытаний.

По результатам оценки СМК собираются объективные свидетельства в форме отчетов, информации, поступающие от потребителей, сведения о функционировании процессов и соответствии продукции (услуги), предложения по предупреждающим действиям, данные о мероприятиях, проведенных по результатам предыдущих проверок, перечень о значимых изменениях во внутренней и внешней средах организаций, рекомендации по улучшению и т. п. Объективные свидетельства могут быть получены путем наблюдений, измерений, испытаний и другими способами. Поэтому сама оценка для сбора данных о системе предусматривает контроль, испытания, верификацию, валидацию с последующим их анализом.

Поставленные в данной работе вопросы, хотя и обсуждаются в специальной литературе, требуют более широкой научно-методической дискуссии специалистов по менеджменту и метрологии, разработки практических алгоритмов более продуманного внедрения измерений в СМК. В заключение следует отметить, что ослабленное внимание высшего руководства к инструментальным, метрологическим методам выявления и установления причин несоответствий, несерьезный подход к нормоконтролю документации и им подобные действия снижают темпы улучшения результативности СМК, не позволяют сделать корректирующие и предупреждающие действия в системе более эффективными.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Федюкин В. К., Дурнев В. Д., Лебедев В. Г. Методы оценки и управления качеством промышленной продукции. М.: Информационно-издательский дом "Филинь", Рилант, 2000. 328 с.
2. Микутьчик А. А. Система качества: преодоление проблемы неопределенности // Методы менеджмента качества. 2002. № 7. С. 43—45.

В. А. ВАСИЛЬЕВ, д-р техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Проблемы управления качеством в российской промышленности

История наглядно демонстрирует, что в условиях жесткой конкуренции лишь высокое качество производимой продукции и оказываемых услуг является единственной гарантией успешной деятельности любой организации. Сегодняшние лидеры в бизнесе — это лидеры в области качества. Качество жизни населения отдельных регионов и стран напрямую связано с качеством выпускаемой ими продукции. Всем очевидно необходимость и важность скорейшего решения проблем и задач в области качества для достижения взаимного удовлетворения интересов производителей, потребителей продукции и общества в целом. Экономическое возрождение России, ее регионов невозможно без существенного повышения качества отечественных товаров.

В настоящее время многие российские предприятия стоят перед насущной задачей повышения конкурентоспособности своей продукции. Такая ситуация возникла из-за объективной необходимости выхода на новые рынки сбыта, в том числе и зарубежные. Но без должного уровня качества выпускаемая продукция не может быть конкурентоспособной. На основе многочисленных данных можно убедиться, что многие отечественные производители неконкурентоспособны на внешних рынках, а зачастую проигрывают иностранным производителям и на отечественном рынке.

Отставание качества российских товаров от качества товаров промышленно развитых стран может привести к экономической и социальной катастрофе. Качество потребительской продукции и услуг в нашей стране на протяжении многих лет зачастую было ниже, чем в других развитых странах. Однако это отставание "компенсировалось" высоким качеством и технологическим уровнем продукции военно-промышленного комплекса. С изменением политического строя и падением роли оборонных отраслей промышленности отечественный опыт управления качеством, накопленный десятилетиями, в значительной степени оказался забытым. Мы оказались как бы на пустом месте. Особенно это касается вновь созданных предприятий, не имеющих навыков управления качеством. Используемые в нашей стране критерии в области качества как и прежде направлены большей частью лишь на производственный процесс и его продукцию, а система управления качеством и сам человек как потребитель все еще остаются на втором плане.

В силу объективных обстоятельств российским предприятиям все чаще приходится решать вопросы, связанные с управлением качеством и сертификацией. Разработка, внедрение и сертификация системы качества в соответствии с международными стандартами серии ИСО-9000 становятся необходимыми этапами развития современного предприятия, обеспечивающего конкурентоспособность своей продукции или услуги как на внутреннем, так и на внешнем рынке. В связи с этим резко возрос спрос на консультационные услуги по вопросам управления качеством и особенно подготовки предприятий к процедуре сертификации системы качества, что, в свою очередь усилило роль аудиторских и консалтин-

говых компаний, а также послужило толчком к развитию научных исследований в данной области.

Важным гарантом достижения современного уровня и стабильности показателей качества продукции, как известно, является функционирование современной системы менеджмента качества, являющейся системой менеджмента для руководства и управления организацией применительно к качеству. Очевидным является стремление решать все управленческие задачи оптимальным образом. Но для этого необходимо иметь научно-методическую базу, являющуюся основой формирования эффективных и научно обоснованных управленческих решений, принимаемых на различных этапах жизненного цикла сложной системы с целью достижения высокого уровня гарантии создания продукции в полном соответствии с установленными требованиями. Базовая концепция управления организацией, работающей на принципах системы менеджмента качества, — это влияние на процесс, а не только на его результаты. Процессный подход является одним из основополагающих требований современной системы менеджмента качества. Многие из статистических методов управления качеством нацелены именно на управление процессами, а относительно малые затраты на их внедрение и применение и высокая эффективность этих методов позволяют говорить об их интеграции в современную систему менеджмента качества.

Наряду с этим появляется необходимость разработки новых средств, методов и инструментов управления качеством, способных дополнить и развить возможности организации при разработке и функционировании системы менеджмента качества. В настоящее время прослеживается тенденция роста востребованности предприятий-производителями идей и научно-методических разработок по решению проблемы обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции. Становится очевидным, что производители ждут конкретной помощи от профессионалов в области качества.

Успех в решении проблем качества может быть достигнут только при обеспечении органичного сочетания отечественных и зарубежных разработок и накопленного практического опыта. В условиях современного рынка повышение конкурентоспособности означает уменьшение сроков освоения новой продукции, сокращение затрат на ее производство, повышение качества продукции. Наиболее эффективными направлениями приложения усилий для достижения этих целей являются распространение ИПИ-технологий на всех стадиях жизненного цикла изделий и проникновение идей построения системы менеджмента качества (СМК) во все уровни организационной и технологической деятельности предприятия. Использование современных CALS-технологий или информационной поддержки изделия (ИПИ-технологии) применительно к управлению качеством в аэрокосмической и других отраслях промышленности доказало свою эффективность.

Интеграция систем предполагает ряд организационных и технических мероприятий, реорганизующих деятельность подразделений предприятия. Эти действия целесообразно объединить с построением системы ме-

неджмента качества, поддерживающей основные производственные процессы.

Исследования информационных моделей деталей, сборочных единиц и агрегатов изделий различного назначения (планер, силовые установки) позволяют построить информационную модель обобщенного элемента системы технологического мониторинга продукции (ТМП). Интерфейс между ERP-системой и системой подготовки производства требует создания информационного слоя, в котором конструкторско-технологическая информация будет накапливаться. Целесообразно эту информационную модель использовать в СМК для подтверждения соответствия продукции.

Процессно-ориентированное управление предполагает выполнение ряда подготовительных действий: выделение процессов; описание процессов, определение их взаимосвязей; управление процессами; совершенствование процессов.

Выделение процессов предприятия и их идентификация — задача сложная и трудоемкая. Существует несколько подходов к ее решению:

- выделение процессов на основе детализации стадий жизненного цикла продукции предприятия посредством анализа функциональности предприятия;

- выделение процессов, используя методы бенчмаркинга;

- построение структуры процессов, отталкиваясь от требований ГОСТ Р ИСО 9004—2001 "Системы менеджмента качества. Рекомендации по улучшению деятельности".

Каждый выделенный процесс на предприятии необходимо описать. Деятельность по описанию процесса можно разделить на две части.

К первой части относится определение процесса в целом, т. е. его внешнее описание. Процесс представляется в виде функционального блока, преобразующего вход в выходы при наличии необходимых ресурсов (механизмов) в управляемых условиях. В описание процесса включается информация о входных и выходных данных, комплекте документов, описывающих процесс в целом, ресурсах, необходимых для выполнения процесса, показателей качества и т. д.

Ко второй части относится определение последовательности действий внутри процесса, т. е. описание структуры процесса. Существует большое количество способов и методов описания структуры процессов. Например, для решения задач технической подготовки производства желательно использовать комплекс методов анализа получаемых решений:

- диаграмма потоков (Data Flow Diagram) — графическое изображение процесса с применением методологии функционального моделирования IDEF0;

- сетевой график (Activity Network Diagram) — графическое изображение последовательности действий рассматриваемого процесса в контексте "планирования" и определения критических характеристик процесса;

- иерархическое описание процесса (дерево процессов), которое получается, если описывать процессы путем декомпозиции.

Степень подробности описания определяется стадией жизненного цикла и зависит от объекта, степени автоматизации процесса управления, состава решаемых задач и их взаимосвязей. Так, для планирования и управления процессом производства машиностроительного изделия в основу информационной модели может быть положена совокупность маршрутов изготовления дета-

лей, узлов и агрегатов, объединяемая схемой сборки изделия. Такая "производственная спецификация" может быть получена как результат последовательного решения задач (реализации процессов) конструкторско-технологического проектирования на стадии технической подготовки производства средствами PLM-системы либо должна быть подготовлена автономно как исходная информация для функционирования ERP-системы.

Известно, что в эпоху перемен "кадры решают все". Не ресурсы, не деньги, не инфраструктура — они вторичны, а прежде всего кадры, чтобы реализовать инновационный путь развития. Прежде всего нужны кадры, понимающие смысл и технологии, связанные с созданием, внедрением и воспроизводством нововведений, в том числе и в управлении качеством.

Стратегия и методология обеспечения необходимого качества требуют использования современных подходов и принятия квалифицированных решений в многообразной жизненной практике, поэтому все более насущной становится образовательная подготовка специалистов по качеству. Расчеты показывают, что в ближайшее время для российских предприятий потребуются десятки тысяч таких специалистов. Кроме того, им нужны будут тысячи хорошо подготовленных внутренних и внешних аудиторов, что связано не только с введением различных видов сертификации, но и потребностью предприятий в специалистах высокого класса, способных свободно ориентироваться в конъюнктуре рынка и усложняющихся запросах современного общества.

"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского вносит свой немалый вклад в решение этой проблемы. Базовой основой подготовки специалистов с высшим образованием явилась разработка и продвижение государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования по направлению подготовки дипломированного специалиста 657000 "Управление качеством" (утвержден Министерством образования Российской Федерации 27 марта 2000 г.). В направление включена специальность 34.01.00 "Управление качеством". Данный стандарт разработан группой наиболее компетентных в данной тематике вузов — МАИ, МИЭМ, МАТИ, ЛЭТИ в лице их представителей: д-ра техн. наук Б. В. Бойцова, д-ра техн. наук В. Н. Азарова, канд. техн. наук С. А. Степанова и др. Выпускникам присваивается двойная уникальная квалификация инженер-менеджер.

На основе анализа потребностей и тенденций современной российской экономики сформулированы требования к содержанию образования специалистов в области качества, сочетающих в себе инженерную, информационную и экономическую подготовку, способных применять и разрабатывать методы, инструменты и принципы систем управления качеством. В данный момент идет подготовка нового образовательного стандарта третьего поколения.

Кафедра управления качеством и сертификации (УКС) факультета экономики и менеджмента в промышленности им. В. Б. Родина "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского одна из первых (как участник разработки стандарта) в 1999 г. начала подготовку по новой специальности 34.01.00 "Управление качеством", имея опыт подготовки специалистов по качеству в рамках специализации "Управление качеством и сертификация" специальности 06.08.00 "Экономика и управление". Понимая важность непрерывной подготовки по качеству, руководство "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского организовало повышение квалификации и переподготовку специалистов, получена лицензия и организована работа по

специальности аспирантуры и докторантуры 05.02.23 "Стандартизация и управление качеством продукции" и 05.02.22 "Организация производства". Создан и утвержден ВАК РФ диссертационный совет (Д.212.110.03) по присуждению степеней доктора и кандидата технических наук по этим специальностям. Аспиранты МАТИ активно используют возможность защиты в этом совете. Основываясь на опыте управления качеством в авиационной, ракетно-космической и других оборонных отраслях промышленности и последних мировых достижениях, преподавательский коллектив кафедры УКС подготовил комплекс учебно-методических материалов для студентов, аспирантов и работников предприятий [1—13].

Специалист любой сферы деятельности только тогда по-настоящему компетентен, когда в условиях развития науки и изменяющейся социальной практики способен переоценить накопленный опыт, проанализировать свои возможности, приобрести знания, используя современные информационные образовательные технологии. Для получения практических навыков у специалистов в области качества в 2003 г. на базе кафедры "Управление качеством и сертификация" "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского создан Учебно-научный центр "Экспертиза, консалтинг, образование, сертификация". В мае 2003 г. центр получил аттестат аккредитации органа по сертификации систем качества в соответствии со стандартом ИСО 9001—2001 и был зарегистрирован в государственном реестре РФ. Основные направления деятельности центра видны из его названия. МАТИ и УНЦ "ЭКОС" предоставляют услуги в следующих областях:

— сертификация систем менеджмента качества в соответствии со стандартом ГОСТ Р ИСО 9001—2001;

— образовательная и научная деятельность: подготовка специалистов в области управления качеством (высшее очное и заочное образование, программы и курсы переподготовки и повышения квалификации, консультации по обучению в аспирантуре и докторантуре); разработка и реализация научных и научно-исследовательских проектов;

— экспертиза научных и научно-исследовательских проектов и разработок;

— консалтинговые услуги в области разработки, внедрения и подготовки к сертификации систем менеджмента качества (СМК), оптимизации бизнес-процессов предприятия, технологической подготовки производства, внедрения и поддержки CALS-технологий.

В рамках выполняемых работ УНЦ "ЭКОС" привлекает высококвалифицированных консультантов, экспертов, преподавателей и аудиторов. Специалисты УНЦ "ЭКОС" имеют большой опыт практической деятельности, а также сертификаты и дипломы различных государственных и международных систем и организаций. Для приобретения практических навыков руководство кафедры "Управление качеством и сертификация" приняло решение привлечь к работе центра студентов и аспирантов.

УНЦ "ЭКОС" участвует в отраслевых, федеральных и международных конкурсах научных проектов. По заказам различных предприятий разрабатывает информационное и методическое обеспечение, внедряет научные и методические разработки, осуществляет мониторинг и контроль. Заказчиками на научные и методические разработки УНЦ "ЭКОС" являются как ведущие предприятия машиностроительной и аэрокосмической отраслей, так и предприятия малого и среднего бизнеса.

Орган по сертификации систем менеджмента качества АНО "УНЦ "ЭКОС" занимается также сертификацией

деятельности в области образования: обучение, сертификация учреждений образования, разработка образовательных и научных программ. Одним из результатов реализации научных программ центра стало создание системы добровольной сертификации услуг обучения (повышения квалификации) кадров и сертификации систем менеджмента качества организаций, осуществляющих обучение (повышение квалификации) кадров и разработку документации для нее.

В 2004 г. состоялся первый выпуск по специальности 34.01.00 "Управление качеством" — знаменательное событие для молодых специалистов и преподавательского состава кафедры. Заканчивается ли на этом подготовка специалиста в области качества? В соответствии с учебным планом специалист получает необходимые для профессиональной работы теоретические знания, но для успешной работы требуются и практические навыки. На кафедре УКС всерьез занимаются и этой составной частью образовательного процесса. В первую очередь хотелось бы отметить серьезную научную работу студентов. Это тема для отдельной статьи, но некоторые аспекты можно обозначить: победа в конкурсе аспирантских грантов, награждение трех молодых ученых и студентов премией Правительства Москвы, участие студентов в подготовке и проведении научных конференций (в первую очередь — проводящейся ежегодно на базе "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского Всероссийской конференции "Управление качеством"), участие студентов и аспирантов в бюджетных и хоздоговорных НИР.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Управление качеством и сертификация* / В. А. Васильев, Ш. Н. Каландаришвили, В. А. Новиков, С. А. Одинокоев. М.: Интермет Инжиниринг, 2002. 416 с.
2. *Барабанова О. А., Васильев В. А., Одинокоев С. А.* Семь инструментов контроля качества. М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. 88 с.
3. *Барабанова О. А., Васильев В. А., Москалев П. В.* Семь инструментов управления качеством. Бенчмаркинг. Развертывание функции качества. М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. 48 с.
4. *Шолом А. М., Александровская Л. Н., Круглов В. И.* Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем. М.: ЛОГОС, 2002. 716 с.
5. *Васильев В. А., Каландаришвили Ш. Н.* Экспертная оценка качества: принципы и практика. М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2003. 100 с.
6. *Научные предпосылки и практика производства метастабильных материалов* / В. А. Васильев, А. А. Лозован, И. Н. Пашков, М. М. Серов. М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2002. 206 с.
7. *Афонин А. Ю.* Добровольная сертификация программ подготовки менеджеров. М.: Ассоциация менеджеров, 2002. 68 с.
8. *Организация производства: Учебник для вузов* / В. Б. Родионов, В. А. Васильев и др. / Под ред. О. Г. Туровца. М.: Экономика и финансы, 2002. 452 с.
9. *Управление качеством технологических процессов* / В. А. Васильев, А. А. Калинин, С. А. Одинокоев, В. С. Родионов. М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2001. 84 с.
10. *Васильев В. А., Каландаришвили Ш. Н., Чайка И. И.* Системный подход к качеству. М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2001. 84 с.
11. *Оценка готовности предприятия к сертификации системы качества* / А. Ю. Афонин, В. А. Васильев, Р. М. Гатауллин, В. С. Родионов. М.: ЛАТМЭС, 2001.
12. *Современное управление качеством на предприятии: методы, инструменты, рекомендации* / В. А. Васильев, А. Ю. Афонин, М. А. Скворцов и др. / Под ред. В. А. Васильева. М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2002. 196 с.
13. *Цырклов А. В.* Методология проектирования в мультиплексной информационной среде. М.: ВИМИ, 1998. 281 с.

И. В. МОЛЧАНОВА, канд. техн. наук, Г. И. ДВОСКИН, канд. техн. наук,
Е. А. СОСЕДОВ, аспирант, Г. И. ЧИВИКИНА, канд. техн. наук
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Экологически чистая утилизация твердых отходов в маломасштабных установках ЭЧУТО

Разработанная специалистами "ЭНИН" им. Г. М. Кржижановского технология экологически чистого уничтожения органосодержащих твердых отходов (ЭЧУТО) предназначена для того, чтобы с помощью маломасштабных установок (модулей) решить проблему экологически чистого уничтожения различных материалов прямо в местах их накопления вместо дорогостоящего и опасного с точки зрения экологии депонирования на полигонах (рис. 1).

Исходя из поставленной задачи при разработке технологии в качестве основополагающих были приняты следующие основные положения:

- наиболее полное уничтожение органической составляющей отходов;
- уничтожение отходов непосредственно в местах их первоначального накопления с минимальной предварительной сортировкой, сводящейся к их загрузке в приемное устройство;
- обеспечение соответствующей нормативам экологической чистоты выбрасываемых в окружающую среду продуктов переработки;
- возможность утилизации теплового потенциала уничтожаемых отходов;
- технологическое оборудование должно быть маломасштабным.

Являясь вариантом термического уничтожения органосодержащих материалов, технология предполагает ее использование для уничтожения отходов (пластиков, резины и др.), сжигание которых обычными методами потенциально опасно для окружающей среды.

Технология предусматривает последовательно осуществляемые пиролиз (газификацию) отходов и дожигание коксового остатка в специальном контейнере с внешним обогревом, размещенном внутри установки. Выделяющиеся в ходе пиролиза газообразные продукты

поступают в топочную камеру устройства, их горючие компоненты сгорают, а образующиеся дымовые газы, отдав тепло на нагрев контейнера, после каталитического дожигания и доочистки в "мокром" скруббере выбрасываются в атмосферу. Полукокс на второй стадии процесса дожигается внутри контейнера в режиме, регулируемом количеством подаваемого воздуха, а образующиеся дымовые газы проходят тот же путь через топочную камеру и систему дымоходов.

Коксозольный остаток (КЗА), масса которого составляет 5—12 % исходной массы отходов, выгружают по мере его накопления. По заключению НИИ экологии и гигиены окружающей среды им. А. Н. Сысина он отнесен к IV классу опасности.

Принципиальным условием организации процесса является обеспечение обязательного прохождения всех покидающих устройство продуктов через огневую зону, т. е. обеспечение огневого обезвреживания.

И, наконец, в силу того, что реализуется принцип маломасштабности и территориальной рассредоточенности установок, нет опасности влияния каждой отдельной установки на атмосферный фон данной территории даже без применения дополнительных средств очистки дымовых газов, хотя в особых случаях при уничтожении отходов с высоким содержанием потенциально опасных компонентов не исключается применение дополнительно известных способов доочистки дымовых газов (катализаторов, активированного угля, скруббера, фильтров и др.).

Основной принцип технологии ЭЧУТО — не прямое, двухступенчатое сжигание органосодержащих отходов: предварительное среднетемпературное термическое разложение (пиролиз) исходного сырья и сжигание газообразных продуктов с использованием полученного тепла для поддержания процесса; дожигание коксового остатка.

Технология реализована с помощью маломасштабных установок контейнерного типа для уничтожения мусора непосредственно в месте его возникновения (в небольших населенных пунктах, а также в больших городах на отдельных предприятиях). При этом одновременно решаются три задачи: экологически чистое уничтожение отходов; экономия средств, затрачиваемых на вывоз и депонирование мусора; получение тепловой энергии (в виде горячей воды).

Установки ЭЧУТО предусматривают уничтожение отходов следующих видов: твердых бытовых и промышленных; пищевых; больничных и ветеринарных; резинотканевых; текстильных, включая промасленную ветошь, и других, содержащих органику.

Высококалорийные материалы типа резины, полимерных пленок, нефтесодержащих и лакокрасочных отходов перерабатывают в смеси с менее калорийными от-

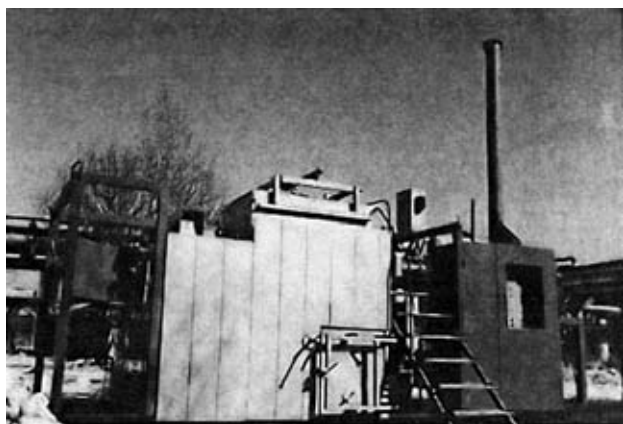


Рис. 1. Общий вид установки ЭЧУТО 150.03

ходами. Имеется санитарно-гигиеническое заключение на отходы всех видов, включая отходы ЛПУ классов А, Б, В.

Выпуск установки осуществляет ООО НПО "Экотех-слав" в г. Переславле-Залесском Московской области. В настоящее время в опытную эксплуатацию введены более 30 установок на территории РФ.

Техническая характеристика установки ЭЧУТО 150.03

Габаритные размеры (с площадкой обслуживания), м	4,0 × 2,5 × 2,5
Высота трубы, м	10
Масса, кг	3500
Энергопотребление:	
электроэнергия, кВт · ч	≤ 10,0
дизельное топливо, кг/ч	2,6—5,2
Продолжительность рабочего цикла, ч	1,5—2,0
Производительность, м ³ /сут (кг/ч)	≤ 3,7 (50)
Производимая тепловая энергия (горячая вода) МДж/ч (Гкал/ч)	125,4 (0,03)
Численность обслуживающего персонала, чел.	1

Основные агрегаты установки ЭЧУТО-150.03 (рис. 2) и их назначение

Терморреактор предназначен для термического уничтожения отходов методом пиролиза и частичной газификации с последующим огневым обезвреживанием полученных газообразных продуктов при 1200—1300 °С. Терморреактор включает камеру термического разложения (КТР), устройство сбора и транспорта газообразных продуктов газификации из КТР в комбинированную горелку, обогреваемый воздуховод для подачи в горелку горячего окислителя (воздуха), высокотемпературную циклонную топку и немеханизированную систему загрузки отходов и выгрузки коксозольного остатка.

Топливная система состоит из топливной емкости, трубопроводов и блочной горелки для жидкого (Riello 40F5) или газообразного (Riello 40FS5) топлива, оснащенной

системой автоматического управления. С помощью этой горелки производится разогрев установки до рабочих температур и стабилизация процесса огневого обезвреживания продуктов газификации.

Каталитический картридж (дожигатель) обеспечивает процесс полного окисления продуктов сгорания, покидающих терморреактор при 300—450 °С. В основу конструкции положен типовой каталитический дожигатель, разработанный отечественными производителями.

Теплообменник жаротрубный производит утилизацию тепла (125,4 МДж/ч) отходящих дымовых газов и при наличии циркуляционной системы обеспечивает обогрев рабочих помещений.

Система газоочистки (с тройной системой газоочистки от мелкой пыли, эффективность улавливания 99,5—99,8 %) состоит из циклонной, газопромывной и двух ступеней ударной очистки. В качестве улавливающей жидкости используется смесь эмульсола и воды, обладающая щелочной реакцией и содержащая небольшое количество масла, что значительно увеличивает ее улавливающую способность.

Тягодутьевая система обеспечивает удаление дымовых газов из терморреактора, просасывая их через каталитический картридж, теплообменник и скруббер. Дымосос типа ВВР обеспечивает заданное разрежение во всех аппаратах установки, что значительно уменьшает количество вредных выбросов, так как все они проходят через огневую зону терморреактора. Уходящие газы выбрасываются в дымовую трубу высотой 10 м, что позволяет обеспечить необходимую ПДК вредных выбросов в атмосферном воздухе рабочей зоны.

Содержание вредных веществ не превышает значений предельно допустимых концентраций на уровне дыхания человека (мг/м³): <5,0 СО; <0,5 SO₂; <0,085 NO₂; <0,5 диоксинов + фуранов.

На установку получены санитарно-эпидемиологическое заключение, заключения ВНИИ противопожарной обороны, ВНИИ сертификации, Государственной экологической экспертизы, а также экспертное заключение РАМН НИИ им. А. Н. Сысина об определении класса опасности коксозольных остатков при переработке ТБО и медицинских отходов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малые установки для термического обезвреживания органосодержащих отходов* / И. В. Молчанова, Г. И. Двоскин, А. Д. Старостин, Г. И. Чивикина // Чистый город. 1999. № 3(7).
2. *Экологическая сертификация установок ЭЧУТО для экологически чистого уничтожения твердых органосодержащих отходов* / И. В. Молчанова, Г. И. Двоскин, Е. А. Соседов, Т. Н. Константинова // Научные труды "МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского. 2006.
3. *Локальное уничтожение отходов в маломасштабных установках* / И. В. Молчанова, Г. И. Двоскин, Т. Н. Константинова, Н. В. Русаков // Экология для предприятий. 2001. № 3.

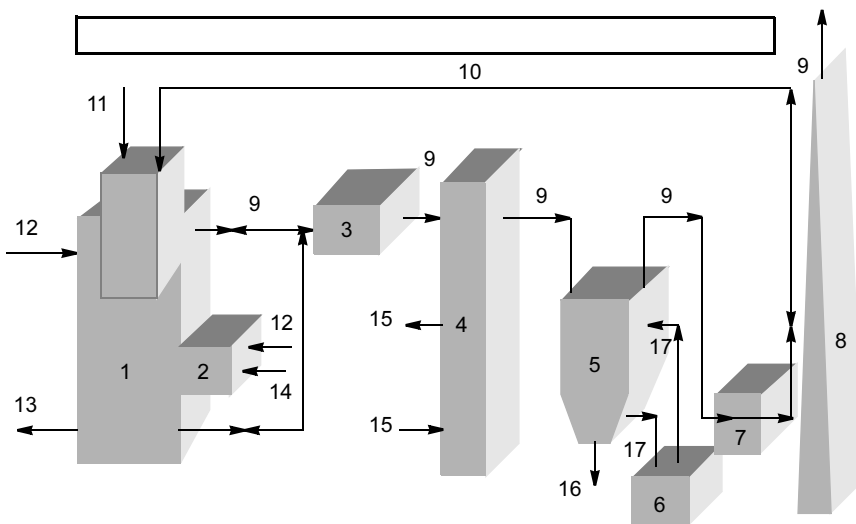


Рис. 2. Технологическая схема установки ЭЧУТО 150.03: 1 — терморреактор; 2 — горелка; 3 — картридж катализатора; 4 — теплообменник; 5 — скруббер; 6 — эмульсионный бак; 7 — дымоотсос; 8 — дымовая труба; 9 — дымовые газы; 10 — рецикл дымовых газов; 11 — отходы; 12 — воздух; 13 — зола; 14 — топливо; 15 — отводимое тепло; 16 — шлам; 17 — водоэмульсионная смесь

Р. С. ГОЛОВ, канд. экон. наук
"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского

Конкурсные закупки как барьер реализации потенциала энергосбережения в бюджетной сфере

Энергоэффективность экономики — одна из ключевых проблем развития всех современных государств. Устойчивое энергосбережение — необходимое условие международной, экономической и социальной стабильности в целом. В своем ежегодном послании Федеральному собранию Российской Федерации в 2006 г. Президент Российской Федерации В. В. Путин отметил: "Следует кардинально повысить эффективность потребления энергии". В настоящее время "эффективность использования энергии, даже со ссылкой на климатические условия, у нас в разы ниже, чем у прямых конкурентов России на мировых рынках". Повышение эффективности энергопотребления в Российской Федерации относится к первоочередным приоритетным задачам, что отражено в поручении Президента Российской Федерации от 7 июля 2006 г. № Пр-1141 о подготовке и внесении в установленном порядке программы "Повышение эффективности энергопотребления в Российской Федерации". Эта же проблема по инициативе Президента Российской Федерации стала центральной в прошедшем году в период председательства России в "большой восьмерке". Только рациональное

использование и экономное расходование энергоресурсов позволят обеспечить устойчивое развитие общества.

Современная российская экономика энергорасточительна. Важнейшим параметром, определяющим энергетическую эффективность национальной экономики, является энергоемкость валового внутреннего продукта (ВВП). Энергоемкость ВВП — это отношение суммарного энергопотребления к величине ВВП. На рис. 1 приведено количественное сравнение значений энергоемкости валового внутреннего продукта для разных стран.

Энергоемкость ВВП России более чем в 3 раза превышает значения аналогичного показателя наиболее промышленно развитых стран. Кроме того, в последнее двадцатилетие в развитых странах наблюдался энергоэффективный экономический рост (на 1 % прироста ВВП приходилось в среднем лишь 0,4 % прироста топливно-энергетических ресурсов). В результате энергоемкость ВВП в среднем по миру уменьшилась за этот период на 18 %, а в развитых странах — на 21—27 %. В отличие от этой глобальной тенденции в России из-за глубокого экономического кризиса энергоемкость ВВП не снижалась, а увеличилась (в 1990—1998 гг. на 13 %). Лишь в последние годы по мере восстановления экономики она начала снижаться, составив в 2002 г. около 94 % уровня 1990 г. [1].

Однако достигнутых результатов явно недостаточно для решения масштабных задач, стоящих сейчас перед российским обществом. Прежде всего, это касается планов удвоения ВВП, реализация которых невозможна без снижения его энергоемкости. В соответствии с расчетными параметрами Энергетической стратегии России на период до 2020 г., утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 28 августа 2003 г. № 1234-р, показатель удельной энергоемкости ВВП, без реализации которого не может быть обеспечен прогнозируемый рост экономики страны, должен снизиться к 2010 г. по отношению к уровню 2000 г. на 26—27 % и на 45—55 % к 2020 г. Это позволит при росте экономики за двадцать лет в 2,3—3,3 раза ограничиться ростом потребления энергии лишь в 1,25—1,4 раза, в том числе электроэнергии — в 1,35—1,5 раза. Электроэнергетическая отрасль является наиболее характерным примером, иллюстрирующим актуальность проблемы высокой энергоемкости. В ближайшее время электроэнергетика может стать тормозом на пути развития российской экономики, так как уже сейчас она с трудом обеспечивает растущие потребности в своей продукции. В сентябре 2006 г. прирост электропотребления по России составил 4,8 % при среднем увеличении спроса на 1,7 % в предшествующий период. С учетом сохранения существующей динамики роста электропотребления, а также недостаточного темпа ввода генерирующих мощностей существует реальная угроза дефицита электроэнергии (рис. 2), ограничивающего экономический рост. Таким образом, энергосбережение и повышение энергоэффективности использования

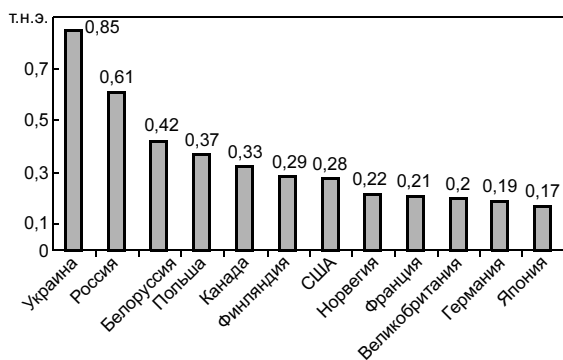


Рис. 1. Энергоемкость ВВП (тонна нефтяного эквивалента (т. н. э.) на 1000 долл. США)

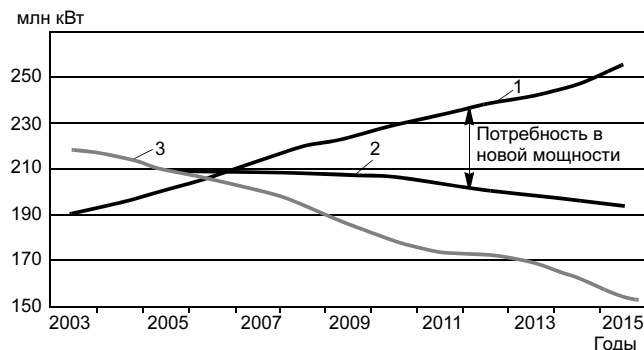


Рис. 2. Баланс установленной мощности (с учетом выбытия) и потребности в генерации: 1—3 — требуемая, действующая мощность и мощность с истекшим сроком службы соответственно

энергоресурсов определяют в настоящее время вектор экономического развития России.

Российская экономика располагает значительным потенциалом энергосбережения. По оценкам, принятым в Энергетической стратегии России до 2020 г., существующий потенциал энергосбережения составляет 360—430 млн т условного топлива (т.у.т.). Это почти половина потребляемого в стране первичного топлива или суммарного энергопотребления таких развитых европейских стран, как Испания, Швеция, Норвегия, Дания, Бельгия. Согласно данным, представленным заместителем директора Департамента топливно-энергетического комплекса Минпромэнерго РФ С. Михайловым на состоявшейся в Казани конференции по сотрудничеству европейских и российских энергетических агентств, почти треть потенциала энергосбережения сосредоточена в топливно-энергетическом комплексе, еще 35—37 % — в промышленности и 25—27 % — в жилищно-коммунальном хозяйстве. Значительный потенциал энергосбережения сосредоточен в бюджетной сфере. В абсолютном выражении он составляет 18—22 млн т.у.т. [2] (рис. 3).

Объекты бюджетной сферы являются довольно энергоемкими. По доле расходов на энергоресурсы и воду в себестоимости услуг они превосходят машиностроение, строительство, сельское хозяйство и даже цветную металлургию.

Анализ зарубежного опыта в области энергоэффективности также показывает, что сокращение потребления энергии на объектах федеральной бюджетной сферы является основной обобщенной задачей, решаемой в рамках национальных программ по эффективному использованию и сохранению энергоресурсов, а также развитию энергоменеджмента.

Важнейшим необходимым условием реализации потенциала энергосбережения в бюджетной сфере является наличие соответствующей нормативно-правовой базы. Однако действующее законодательство не только не создает стимулов для энергосбережения, но в ряде случаев ставит барьеры, ему препятствующие. Прежде всего, таким барьером является законодательство о госзакупках.

В Российской Федерации конкурсная система закупок продукции для государственных нужд практически начала формироваться с выходом Указа Президента Российской Федерации от 8 апреля 1997 г. № 305 "О первоочередных мерах по предотвращению коррупции и сокращению расходов при организации закупки продукции для государственных нужд". В дальнейшем конкурсная система была закреплена в законодательном порядке Федеральным законом от 6 мая 1999 г. № 97-ФЗ "О конкурсах на размещение заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных нужд". С 1 января 2006 г. вступил в силу Федеральный закон "О размещении заказов на поставки товаров, выполнение работ, оказание услуг для государственных и муниципаль-

ципальных нужд" от 21 июля 2005 г. № 94-ФЗ. Согласно ч. 2 ст. 22 данного закона, конкурсная документация должна содержать требования, установленные заказчиком, уполномоченным органом, к качеству, техническим характеристикам товара, работ, услуг, требования к их безопасности, требования к функциональным характеристикам (потребительским свойствам) товара, требования к размерам, упаковке, отгрузке товара, требования к результатам работ и иные показатели, связанные с определением соответствия поставляемого товара, выполняемых работ, оказываемых услуг потребностям заказчика. В свою очередь, ч. 4 ст. 28 этого же закона устанавливает критерии оценки заявок на участие в конкурсе:

- функциональные характеристики (потребительские свойства) или качественные характеристики товара, качество работ, услуг;
- расходы на эксплуатацию товара;
- расходы на техническое обслуживание товара;
- сроки (периоды) поставки товара, выполнения работ, оказания услуг;
- срок предоставления гарантии качества товара, работ, услуг;
- объем предоставления гарантий качества товара, работ, услуг;
- цена контракта;
- другие критерии в соответствии с законодательством Российской Федерации о размещении заказов.

Как видно, требования по энергоэффективности в приведенном перечне критериев отсутствуют. Это означает, что реализация потенциала энергосбережения в бюджетной сфере в рамках действующего законодательства по регулированию государственных закупок сопряжена с очевидными рисками правового характера. В качестве примера можно привести результаты реализации федеральной целевой программы "Энергоэффективная экономика" на 2002—2005 гг. и на перспективу на 2010 г., в которой были определены основные направления работ по энергосбережению в энергоемких отраслях промышленности, сельском хозяйстве, жилищно-коммунальном хозяйстве, на транспорте, в федеральной бюджетной сфере и в отраслях топливно-энергетического комплекса. Реальные результаты за 2002—2005 гг. как по выделенным инвестициям, так и экономии топливно-энергетических ресурсов (ТЭР) оказались в 1,5—2 раза ниже намеченных программой. Экономия ТЭР составила 116 млн т.у.т. вместо 150 млн т.у.т., запланированных программой. Разрыв между плановой и фактической экономией ТЭР объясняется, в том числе, отсутствием развитого рынка энергоэффективности (товаров, оборудования, технологий) и несовершенством стандартов энергоэффективности. Тем самым отсутствие унифицированных критериев энергоэффективности в системе оценки конкурсных заявок приводит либо к снижению эффективности закупок в рамках целевой программы, либо вынуждает заказчиков нарушать законодательство о госзакупках.

Законодательство о госзакупках ограничивает реализацию потенциала энергосбережения не только в рамках целевой программы "Энергоэффективная экономика", но и в общем объеме госзакупок, потому что многие из мероприятий, обеспечивающих освоение всего потенциала энергосбережения, являются сопутствующими, выполняемыми в процессе технического перевооружения базовых отраслей экономики и соответствующих инвестиционных программ развития. Это касается самых различных направлений расходования бюджетных средств: строительства зданий и сооружений, проведения работ по рекон-

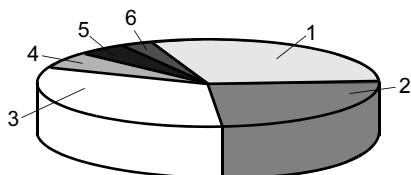


Рис. 3. Потенциал энергосбережения по отраслям (т. у. т.): 1 — энергоемкие отрасли промышленности (110—140); 2 — ЖКХ (95—110); 3 — ТЭК (120—135); 4 — транспорт (23—30); 5 — федеральная бюджетная сфера (18—22); 6 — сельское хозяйство (12—15)

рукции и капитальному ремонту, приобретения разного рода энергоемкого оборудования, сооружения объектов генерации (котельных, тепловых пунктов) и др. В каждом из перечисленных случаев существует определенный потенциал энергосбережения, реализация которого требует определенных затрат, зачастую значительных. Однако в целях соблюдения законодательства в области госзакупок приоритет отдается конкурсным заявкам пусть и с незначительными показателями по энергоэффективности, зато с наименьшими ценами. Таким образом, на этапе размещения заказов получается виртуальная экономия бюджетных средств. Виртуальность выражается в том, что впоследствии на бюджет ляжет дополнительная нагрузка по оплате потребленных энергоресурсов, которые можно было бы сэкономить в результате реализации энергоэффективных мероприятий. При этом в отличие от единовременного характера вложений в энергосбережение бюджетное финансирование генерируется в постоянный денежный поток, ежегодно индексированный ростом тарифов на энергоресурсы. Оценить масштаб возможных финансовых потерь или экономии можно на основе следующих данных: в 2005 г. объем госзакупок с использованием конкурсных механизмов превысил 1 трлн руб., в 2006 г. — более 2,3 трлн руб., а в 2007 г. ожидается 20 %-ный рост объема закупок на конкурсной основе.

Подтверждение приведенных тезисов может быть проиллюстрировано конкретным примером. Значительную часть энергии потребляют здания, например, в России — 40 %. В настоящее время на 1 м² отапливаемого помещения в России расходуется энергоресурсов в 3—4 раза больше, чем в государствах Европы. Главная причина такого положения состоит не в климатических условиях, а в том, что чрезмерно высоки потери тепла через наружные ограждающие конструкции: стены, крышу, двери и окна. Например, при эксплуатации традиционного многоэтажного здания через стены теряется до 18 % тепла, через окна — 40 %, подвал — 10 %, крышу — 18 %, вентиляцию — 14 % [3].

Эффективная теплоизоляция, использование современных технологий и материалов позволят решить эту проблему. За счет реализации мер по повышению энергоэффективности при строительстве и модернизации зданий бюджетной сферы может быть сэкономлено до 100 млрд руб., что приблизительно на 30 млрд руб. превышает объем финансирования энергоснабжения объектов федеральной бюджетной сферы в 2005 г. [4].

Проблема энергосбережения при строительстве и эксплуатации зданий за рубежом хорошо изучена и проработана, чего нельзя сказать о Российской Федерации. В настоящее время строительство энергоэффективных зданий широко осуществляется во всем мире. Особенно впечатляют успехи Западной Европы и Скандинавии. Суммарный эффект экономии тепла во вновь возводимых жилых и коммерческих зданиях здесь составляет 50—70 %. Таким образом, уменьшение теплопотерь является основным направлением энергосбережения, так как при высоких теплопотерях эффективность прочих энергосберегающих мероприятий резко снижается. Качественная оценка воздействия строительства энергоэффективных зданий на ВВП приведена в виде графа воздействий, демонстрирующего процесс изменения ВВП в результате развертывания широкомасштабного строительства энергоэффективных зданий (рис. 4).

Однако, несмотря на ряд потенциальных эффектов, возникающих при строительстве энергоэффективных зданий, в некоторых случаях государственные и муниципальные заказчики вынуждены отказываться от применения энергосберегающих технологий в ущерб снижению теплопотерь из-за барьера, созданного законодательством о государственных закупках (рис. 5).

Строительство энергоэффективного здания подразумевает разработку индивидуального проекта на основе новых энергосберегающих технологий и материалов, что создает дополнительные расходы, связанные как непосредственно с проектированием, так и с разработкой технического задания конкурсной документации (см. рис. 5). Согласно п. 14 ч. 4 ст. 22 Федерального закона от 21 июля 2005 г. № 94-ФЗ, конкурсная документация должна содержать критерии оценки заявок на участие в конкурсе. Естественно, что строительство энергоэффективного здания подразумевает разработку для подрядных организаций требований по теплозащите здания. Например, в Московской области разработаны нормы теплотехнического проектирования гражданских зданий с учетом энергосбережения. Нормы предназначены для обеспечения основного требования — эффективного использования энергии при проектировании зданий путем выявления суммарного эффекта энергосбережения от использования архитектурных, строительных и инженерных решений, направленных на экономию энергетических ресурсов [5].

Таким образом, в качестве базового критерия оценки конкурсных заявок выступает наименьшее значение расчетного удельного расхода тепловой энергии системой теплоснабжения на отопление здания в сопоставлении с требуемой величиной удельного расхода энергии, устанавливаемой нормами. В связи с тем, что периодовые энергосберегающие технологии и материалы значительно удорожают стоимость строительства, то, как правило, выигравшая заявка по критерию энергоэффективности не является одновременно выигравшей по критерию наименьшей цены. Это означает, что другие участники конкурса с заявками, содержа-

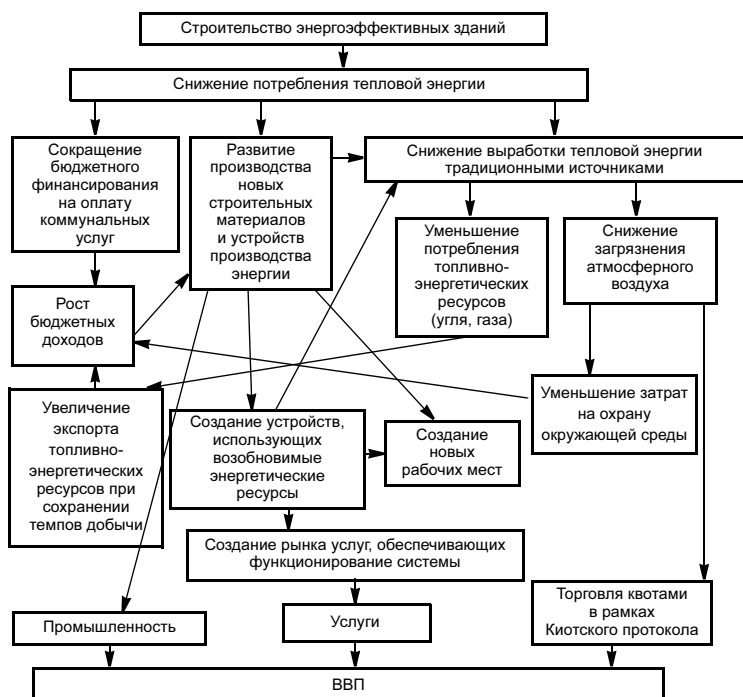


Рис. 4. Возможности роста ВВП за счет масштабного строительства энергоэффективных зданий

Активное применение методов технологического дизайна свидетельствует о способности предприятия активно участвовать в инновационных процессах, характеризует его творческий, экономический и технологический потенциал.

Структура и особенности потребительских качеств

Необходимо еще раз вернуться к структуре и особенностям формирования потребительских качеств изделий и оценить огромные потенциальные возможности методов технологического дизайна в решении главной цели инновационных процессов. Считаем, что при разработке технологического дизайна формообразование изделий с применением композиционных и компоновочных подходов, цветофактурных решений, эргономического проектирования и т. п. достигается на основе современных технологических процессов, реальных возможностей современного производства.

Говоря об оптимальности конструкций оборудования с точки зрения технической эстетики, необходимо учитывать комплекс специфических качеств, определяющих дизайнерские особенности оборудования — композиционное, пропорциональное, метро-ритмическое, цветофактурное, эргономическое и другое решение. Очевидно, эти качества нельзя рассматривать в отрыве от общих технических и технологических качеств. Таким образом, при современном комплексном подходе к проектированию технические требования включают функциональные, технические, технологические, эргономические и эстетические требования.

В области машиностроения общие технические требования можно условно разделить на общие эксплуатационные, компоновочные и технической эстетики.

Эксплуатационные требования. Одним из важнейших эксплуатационных требований к оборудованию в современных условиях является обеспечение комплексной надежности, характеризующей долговечность конструкции и степень обеспечения оптимальности ее психофизиологического взаимодействия с оператором или более широко — эргономичность конструкции оборудования. Поэтому при выборе конструктивных, декоративных и отделочных материалов для корпусов и каркасов оборудования и определении типа их конструкции и технологии изготовления руководствуются жесткими условиями эксплуатации. Требования технической эстетики тесно связаны с эксплуатационными требованиями, так как методы художественного конструирования, направленные на обеспечение высоких потребительских качеств изделия, находят отражение прежде всего в улучшении эксплуатационных показателей оборудования.

Эксплуатационные показатели оборудования — это климатические, механические и эргономические характеристики.

Климатические и механические характеристики определяют в основном такие показатели работы оборудования, как механическая прочность и жесткость конструкции, надежность работы комплектующих узлов и блоков, размещенных в каркасе (корпусе) оборудования, при внешних воздействиях, устойчивость конструкции к воздействию различных климатических факторов, длительность срока службы в условиях эксплуатации.

Эргономические характеристики (в аспекте их влияния на эксплуатационные показатели) определяют оперативность, удобство и безопасность обслуживания.

Компоновочные требования являются едва ли не самыми основными в процессе формообразования, так как их выполнение позволяет создать стройную структуру конструкции — основу рациональной композиционной гармоничной формы. Часть компоновочных требований может быть реализована в процессе инженерного конструирования. К ним можно отнести:

- максимальное сокращение кинематических связей между сборочными единицами оборудования;

- снижение (или полное исключение) взаимных наводок между блоками и электрическими цепями межблочного монтажа, вводами и выводами и т. п.;

- обеспечение рационального размещения и надежного закрепления комплектующих сборочных единиц, блоков и т. п.

Другие же компоновочные требования (рациональные габаритные размеры и масса, максимальный коэффициент использования объема, пропорциональное и метро-ритмическое решение оборудования, удобный доступ к блокам и т. п.) могут быть обеспечены лишь в процессе комплексного дизайнерского проектирования — их целесообразно отнести к дизайнерским компоновочным требованиям.

Требования технической эстетики в целом направлены на выявление и обеспечение дизайнерских качеств оборудования, которые предопределяют оптимальность конструкции с учетом конструктивных, технологических, эстетических и эргономических требований. Требования технической эстетики представляют комплекс социально-экономических, функционально-конструктивных, эргономических и эстетических требований, выполнение которых должно обеспечить создание общественно целесообразного, технически совершенного, экономичного, удобного в эксплуатации и композиционно выразительного оборудования.

Рассмотрев отдельные группы общих технических требований, можно заключить, что сам комплексный характер процесса дизайнерского проектирования предполагает и комплексность требований технической эстетики, которые частично относятся к компоновочным, частично — к конструктивно-технологическим и другим общим техническим требованиям, с которыми они составляют единое целое.

Тем не менее, целесообразно выделить среди общих технических требований собственно требования технической эстетики и эргономики к оборудованию, которые определяли бы научные и практические критерии оптимальности дизайнерского решения.

Эргономические требования прежде всего определяют антропометрические, биомеханические и психофизиологические функциональные возможности оператора в процессе эксплуатации оборудования и требования к компоновке устройств отображения информации и устройств управления, размеры оперативных рабочих зон и т. п.

Психологические требования определяют соответствие оборудования психологическим особенностям человека — особенностям мышления, восприятия, памяти и т. п.

Эстетические требования — требования, направленные на обеспечение композиционной целостности формы оборудования, ее гармоничности и соответствия

общего формообразования оборудования требованиям современного стиля.

При этом логично выделить такие требования, как функциональность формы оборудования (соответствие формы оборудования его технической функции), эргономичность формы оборудования (удобство формы для человека-оператора), уровень композиционного решения формы, стилевое единство решения формы оборудования, технологичность дизайнерского решения, высокое качество обработки и отделки формообразующих поверхностей и т. п.

Таким образом, требования технической эстетики не могут рассматриваться отдельно от общих технических требований — они как бы синтезируют в себе наиболее прогрессивные взгляды на проектирование оборудования, являются их логическим выражением. Требования технической эстетики тесно связаны между собой и зависят от выполнения конструктивно-технологических требований.

Назначение *конструктивно-технологических требований* — обеспечить в процессе проектирования создание совершенного конструктивно-технологического решения. Среди множества этих требований необходимо выделить:

- взаимозаменяемость отдельных узлов и элементов конструкции;
- максимальную типизацию и унификацию оборудования (в том числе и его формообразующих элементов);
- функционально-блочное (модульное) построение конструкции;
- технологичность деталей и узлов конструкции (в том числе формообразующих элементов);
- рациональный выбор конструкционных и отделочных материалов и т. п.

Даже простой взгляд на рассмотренную систему требований технической эстетики к изделиям машиностроения, а соответственно и их качество, показывает, что их обеспечение в процессе дизайнерского проектирования является весьма сложной задачей. Технологический дизайн — сложная, многофакторная проектная деятельность, в которой переплетаются решения экономических, конструктивно-технологических, социальных, эргономических и других задач. Причем этот процесс происходит практически всегда в условиях поисков компромиссных решений в ходе разработки композиционных, технологических, компоновочных и других идей. Это сложная, ответственная работа, причем результаты этой работы (в том числе и отрицательные) хорошо видны при оценке потребительских свойств изделий.

Необходимо отметить, что для того чтобы создать действительно новое дизайнерское решение, дизайнер должен работать творчески, свободно, без постоянной оглядки на технологические возможности, которые бывают подчас весьма ограничены. Технологические возможности формообразования, декоративной отделки, химической обработки поверхностей и т. п. должны быть, безусловно, достаточно обширными и не ограничивать идеи, заложенные дизайнером.

За долгие годы отставания от ведущих зарубежных фирм сформировалась плохая привычка сравнивать уровень отечественных разработок в дизайне с уровнем, достигнутым за рубежом, как единственным, совершенным эталоном. Оценивать уровень зарубежных разработок, анализировать тенденции дизайна за рубежом, безуслов-

но, необходимо, но и отечественные разработки могут вполне не уступать лучшим образцам ведущих фирм.

Не затрагивая в данной работе многие сложные и специальные теоретические вопросы дизайна и эргономики, отметим ряд принципиальных проблем в развитии дизайна как неотъемлемого элемента всей инновационной сферы, а также ряд важных позиций и возможностей дизайна в инновационных процессах.

От единичных объектов — к системам и типажам конструкций

Важной функцией современного технологического дизайна является создание комплексных проектов и типажей изделий. Технологический дизайн давно уже вступил в новый этап своего развития, основное содержание которого — комплексное формирование предметной среды (в данном случае производственной), переход от разработки единичных изделий к созданию их комплексов и систем.

В этих условиях приобретают важность следующие направления исследований:

- определение важнейших характеристик и принципов построения системных объектов (типа человек—машина—производственная среда) с тем, чтобы они стали характерной инновационной чертой, новизной продукции предприятия;
- определение способов и проектных средств целостного формирования объектов такого типа;
- разработка методических принципов практической организации процессов дизайнерского проектирования системных объектов.

Необходимо учесть, что в современном машиностроении развиваются и уже стали главенствующими такие тенденции в проектировании оборудования, как создание комплексов однородного оборудования, проектирование на основе размерно-параметрических рядов, создание типажей изделий. Построение типажей оборудования позволяет осуществлять глубокую унификацию несущих и формообразующих конструкций, оборудования, агрегатов, сборочных единиц и т. п., что обеспечивает высокий эффект для организации специализированного производства, улучшения качества и повышения эффективности эксплуатации оборудования.

В этом смысле декларируемая многими кажущаяся несовместимость методов дизайна и методов стандартизации и унификации при построении типажей конструкций происходит лишь из-за узкого понимания специфики методов дизайна, которые утрачивают возможности композиционного поиска и гармонизации формообразования в условиях ограничений, вносимых стандартизацией.

В действительности и методы стандартизации, и методы дизайна направлены на рационализацию формообразования, его упорядочение, что позволяет достичь значительных результатов. Дизайнерские подходы совпадают с аналогичными идеями конструктивно-технологического и функционального развития типажей и позволяют реализовать идеи гармоничной размерной модульной координации размерно-параметрических рядов, эргономической и композиционной отработки базовых моделей рядов и т. п.

Эти подходы совершенно логично встраиваются в систему инновационного проектирования, так как приводят в результате к получению новых потребительских качеств изделий, радикальным изменениям в их структуре и номенклатуре.

Разработка "фирменного стиля"

Одной из главных задач технологического дизайна в структуре инновационных процессов является создание "фирменного стиля" изделий предприятия. Это по сути основной, хотя и весьма непростой, путь утверждения предприятия на рынке сбыта. Вообще, "фирменный стиль" реально отражает характерные черты предприятия, уровень технологической оснащенности, современность подходов в области организации производства, планирования и управления, которыми владеет предприятие.

"Фирменный стиль" предприятия, воплощенный в характерной компоновке и композиции изделий предприятия, их пластическом, цветофактурном решении и т. п., существует физически и может быть визуально воспринят потребителем.

Если мы говорим о достижении принципиально новых высоких потребительских качеств как главной цели инновационного процесса, то создание и закрепление в сознании потребителя "фирменного стиля", является высшей оценкой дизайнерского проектирования.

"Фирменный стиль" — совокупность свойств, объединяющих визуально-эстетические характеристики изделий данной фирмы (формообразование, метро-ритмические и пропорциональные решения, цветофактурное и графическое исполнение и т. п.), присущих только данному предприятию и выделяющих его визуально на рынке сбыта. Если вникнуть в сущность создания и существования "фирменного стиля" в сознании потребителя, то можно понять, что он отражает специфику предприятия, его инновационную политику, организацию, надежность поведения на рынках сбыта и т. п., таким образом, "фирменный стиль" явление не чисто внешнее.

Задача создания "фирменного стиля" предполагает его оценку с точки зрения управления, технологии и организации производства, стратегии потребления, культуры производства и т. д.

Эффективность создания "фирменного стиля" как метода гармоничного преобразования предметной среды предприятия обуславливает оптимизацию номенклатуры изделий, унификацию и стандартизацию несущих и формообразующих конструкций оборудования, применение единой размерной модульной координации — создание размерно-параметрических рядов, единые эргономические подходы к решению рабочих мест оборудования, единые средства и приемы композиции и формообразования.

Таким образом, единый композиционный подход, проводимый во всех изделиях предприятия, вызывает необходимость применения единых, характерных для предприятия методов конструирования, типовых технологических процессов, решений в области стандартизации и управления качеством и т. д.

Организационные проблемы развития дизайна в машиностроении

В 70-90-х годах XX века в СССР практически на всех машиностроительных предприятиях были созданы и активно работали в структуре отдела главного конструктора подразделения художественного конструирования, которые разрабатывали дизайнерские проекты изделий машиностроения. На головных предприятиях функционировали крупные отделы художественного конструирования. В ряде отраслей, например, электронной, авиационной, радиопромышленности и др., были созданы спе-

циализированные предприятия — конструкторские бюро дизайнерского профиля. Все это позволяло вести разработку крупных проектов в области художественного конструирования изделий машиностроения. Хорошо известны дизайнерские разработки вакуумного напылительного, фотолитографического, электронно-лучевого оборудования для электронного машиностроения, выполненные в те годы — они не уступали дизайнерским разработкам лучших зарубежных фирм.

Работая в структуре реальных разработок предприятия с ориентацией на современные технологические процессы, современную организацию производства, такие подразделения действительно были способны создавать современные стилевые решения и "фирменный стиль" крупных предприятий.

В годы "перестройки" в процессе "структурных перестроек предприятий", их реперофиллирования, свертывания многих направлений разработок наличие дизайнерских подразделений на предприятиях считали излишним и практически все они были ликвидированы.

В настоящее время дизайн как проектная деятельность, являющаяся составной частью инновационных процессов и позволяющая создавать современные композиционные, компоновочные и эргономические решения, формировать "фирменный стиль" предприятий, практически отсутствует в сфере машиностроения. Возможность проведения теоретических и методических разработок в области дизайна в машиностроении также утрачена. Ущерб от подобных структурных перестроек очевиден и он особо остро ощущается при попытках проведения разработки именно комплексных инновационных проектов.

Дизайн отдан на откуп частным дизайн-студиям, дизайн-бюро и т. д. Казалось бы экономически правильный, разумный подход. Но вся беда в том, что если раньше дизайнеры работали в структуре предприятий, владели знаниями по технологиям формообразования, отделки, хорошо знали производство и т. п., вообще весь процесс дизайнерского проектирования проводился как неотъемлемая часть общего процесса проектирования и был тесно связан с решением комплекса функциональных и конструктивно-технологических задач, то дизайнеры частных студий и бюро, как правило, слабо знакомы с состоянием развития и возможностями производства, современной технологией.

Дизайнерское проектирование в этих условиях превращается в некий элитарный процесс, в "упражнения по композиции" без глубокого проникновения в проблематику технологического дизайна. И если эти студии еще успешно могут вести разработки в области бытовых изделий, интерьеров, предметов бытовой среды, то они оказываются беспомощными перед проблемами спецмашиностроения, разработкой новой техники и технологии.

Это понимают все, кто занимается дизайном и на методическом, и на практическом уровнях.

В настоящее время необходимо вновь вернуться к этой проблеме и создать в крупных ведущих научно-производственных объединениях машиностроительного профиля подразделения технологического дизайна. Это позволит глубоко и современно подходить к созданию новых потребительских качеств изделий машиностроения, сделав весь инновационный процесс логичным и завершенным, наполнив его новым инновационным потенциалом, которым обладают методы дизайна.

Т. С. КЛАПЦОВА, канд. техн. наук
"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского

Математическая модель деятельности операторов при решении гомеостатической задачи управления

Введение

В настоящее время одной из важнейших тенденций является развитие больших систем современной техники (единой системы связи, транспорта, единой энергетической системы и др.). Такие системы характеризуются огромным количеством составляющих их подсистем и большими потоками циркулирующей в них информации. В управлении ими участвуют большие коллективы людей. В этой связи становится особенно актуальной задача изучения взаимодействия между операторами и группами операторов. Надежность и эффективность деятельности сложных систем существенно зависят от действий операторов. В сложных системах приходится анализировать поведение не одного человека, а тесно функционально взаимосвязанной группы людей, так называемой "малой группы". Это производственные бригады, экипажи транспортных средств, группы военных специалистов, операторы автоматизированных систем управления и др. Широкий круг вопросов, который возникает перед специалистами при формировании таких групп, включает задачи определения оптимальной численности групп, совместимости ее членов, рационального распределения обязанностей и организации управления с учетом индивидуальных особенностей каждого оператора. Необходимо отметить, что процесс управления большими системами — это не просто сумма параллельных действий, выполняемых операторами независимо друг от друга. Его существенным моментом является взаимосвязь и взаимодействие операторов, т. е. групповая деятельность. Исследование поведения операторов в группе с использованием аппаратно-программных комплексов биотехнического типа открывает широкие возможности для оптимизации стратегии и тактики формирования таких групп. Большой интерес представляют аппаратные методики изучения групповой совместной деятельности гомеостатического типа, которые реализуются на специальных установках, получивших название "Гомеостат".

Методика

Методика "Гомеостат" является классическим инструментом исследования групповой деятельности. Она представляет биотехническую модель взаимосвязанных компонентов, управление которыми осуществляют операторы, и удовлетворяет основным требованиям, предъявляемым к таким устройствам:

— групповая деятельность должна быть простой для исключения предварительной выработки специфических навыков;

— деятельность должна быть взаимосвязанной, т. е. должна предусматривать перекрестные связи операторов;

— оценка оператором результатов своей деятельности должна проводиться опосредованно, через приборы;

— процесс деятельности и ее результаты должны быть объективизированы.

В методике "Гомеостат" каждый из операторов, решая свою задачу, влияет на деятельность остальных. В распоряжении каждого из операторов имеется собственная рукоятка, управления x_i , поворот которой передается на видимые индикаторы u_i с разными коэффициентами усиления a_{ij} . Степень взаимной связи операторов определяется коэффициентом a_{ij} , который может быть как положительным, так и отрицательным. Задача i -го оператора состоит в том, чтобы поворотом рукоятки управления x_i установить индикатор u_i в нулевое положение. При этом i -й оператор видит только свой индикатор, на котором сформирован сигнал

$$u_i = u_{oi} - a_{ij}x_j + a_{i1}x_1 + \dots + a_{i(i-1)}x_{i-1} + a_{i(i+1)}x_{i+1} + \dots + a_{in}x_n, \quad (1)$$

где u_{oi} — начальное значение i -го индикатора.

Фактически операторы поворотом своих рукояток управления x_i должны решить систему линейных уравнений, которую можно представить в векторном виде

$$u_o = Ax, \quad (2)$$

где $u_o = \begin{pmatrix} u_{oi} \\ \dots \\ u_{on} \end{pmatrix}$ — вектор начальных значений индикаторов;

$A = \begin{pmatrix} a_{11} & -a_{12} & \dots & -a_{1n} \\ -a_{21} & a_{22} & \dots & -a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ -a_{n1} & -a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$ — матрица, составлен-

ная из коэффициентов передачи; $x = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \dots \\ x_n \end{pmatrix}$ — вектор

управляющих воздействий, формируемый операторами.

Аппаратные реализации гомеостатической методики весьма разнообразны. На кафедре ЭИИС "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского разработан биотехнический аппаратно-программный комплекс "Гомеостат", реализованный как сетевая программа, в которой каждый оператор решает одно уравнение из системы на персональном компьютере. На мониторе отображается значение невязки (1), а управляющий сигнал формируется двумя кнопками: нажатие одной из кнопок клавиатуры увеличивает сигнал управления x_i на единицу, нажатие другой — уменьшает сигнал на единицу. Такой простой способ управления реализован неслучайно. Оператор при этом обладает минимальным набором движений для решения задачи. Вообще говоря, решение гомеостатической задачи каждым из операторов можно рассматривать как реакцию на ступенчатый сигнал, величина которого определяется в процессе слежения, а действия других опера-

торов — как помехи. Для случая кнопочного управления эти помехи просто влияют на скорость изменения индикатора. Именно по этой причине и были проведены исследования гомеостатической методики, в которой управление осуществляется кнопками.

Результаты эксперимента

На рис. 1 приведены результаты экспериментов для одного оператора и двух входных воздействий $u_1 = 40$ и $u_1 = 20$.

Из анализа результатов следует, что описывать взаимосвязь между входным воздействием, которым является сигнал индикатора u_i , и управляющим воздействием, формируемым оператором x_i , в виде линейного, например апериодического, звена не представляется возможным даже при работе одного единственного оператора, так как переходный процесс, приведенный на рис. 1, зависит от величины входного сигнала, в частности, содержит область, в которой скорость переходного процесса постоянна. Поэтому математическая модель, описывающая деятельность операторов при решении гомеостатической задачи, должна быть нелинейной. Из анализа также следует, что время решения задачи состоит из нескольких зон. В начальный момент времени на индикаторах появляются значения u_{0j} . Рука оператора еще сохраняет начальное положение в течение времени T_0 — времени реакции оператора. Это чистое запаздывание. Далее оператор определяет направление движения, что в случае кнопочного управления легко сделать. Время, в течение которого оператор определяет направление движения, зависит от числа операторов, участвующих в эксперименте. В данной работе эти времена не исследуются и рассматриваются как чистое запаздывание T_0 . Большинство исследователей подразделяют период движения оператора на время первого движения T_1 , в течение которого воспроизводится управляющий сигнал, и время коррекции T_k . Для определения характера зависимости сигнала, формируемого оператором, от времени проведена обработка этого сигнала, в частности, рассчитана его скорость.

На рис. 2 приведена скорость управляющего сигнала, формируемого оператором.

Из анализа рис. 2 следует, что во время первого движения оператор формирует свой управляющий сигнал с постоянной скоростью, определяемой его темпоритмом и психофизиологией. В области корректирующего движения оператор уменьшает свою скорость, согласуя ее

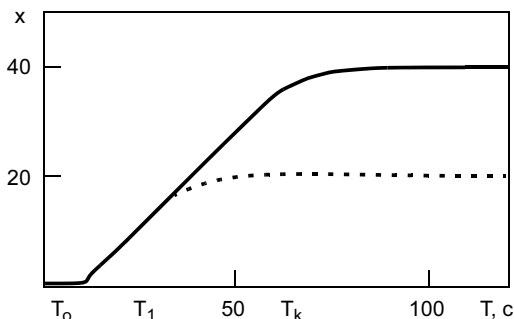


Рис. 1. Зависимость управляющего воздействия, формируемого оператором, от времени при разных уровнях входного сигнала

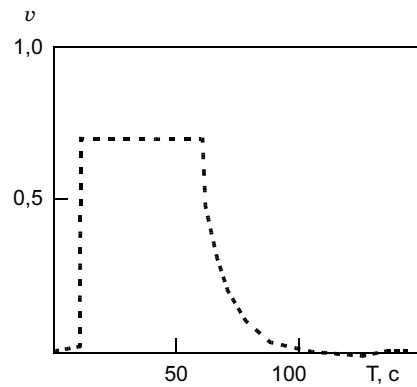


Рис. 2. Зависимость скорости управляющего воздействия, формируемого оператором, от времени

со скоростью партнеров в общем случае и делая ее равной нулю в рассматриваемом случае. В это время его индикатор уже находится в области нуля. Согласование скоростей происходит пропорционально величине индикатора. Таким образом, если в эксперименте участвуют несколько операторов, то наблюдается следующая картина: после времени реакции T_{0i} , индивидуального для каждого участника, операторы формируют свои сигналы управления x_i с оптимальной для себя скоростью v_i . В это время изменение каждого индикатора u_i происходит равномерно с постоянной скоростью, определяемой скоростями формирования сигналов x_i . При таких условиях формирование сигнала x_i происходит автоматически, без участия зрительной обратной связи. Такой способ формирования управляющего сигнала в момент первого движения T_1 отмечался многими исследователями [1]. Далее, когда величина индикатора u_i становится достаточно малой, включается зрительная обратная связь и оператор формирует сигнал управления x_i со скоростью, пропорциональной видимому значению индикатора — величине невязки (1), с коэффициентом пропорциональности T_{0i} . Такой способ формирования сигнала управления операторами в процессе слежения в области частоты среза также общепринят [2], а слежение в переходном процессе происходит в области высоких частот.

Математическая модель деятельности операторов при решении гомеостатической задачи управления

Анализ результатов эксперимента позволяет описать деятельность i -го оператора при решении гомеостатической задачи следующим образом:

$$\begin{aligned} \frac{dx_i}{dt} &= 0, t \leq T_{0i}; \\ \frac{dx_i}{dt} &= v_i, t > T_{0i}, |u_i| \geq \varepsilon_i; \\ \frac{dx_i}{dt} &= \frac{1}{T_i} u_i, t > T_{0i}, |u_i| < \varepsilon_i; \end{aligned} \tag{3}$$

$$u_i = u_{0i} - a_{ij}x_j + a_{j1}x_1 + \dots + a_{j, i-1}x_{i-1} + a_{j, i+1}x_{i+1} + \dots + a_{jn}x_n.$$

Такая модель деятельности согласуется с экспериментальными данными и моделями деятельности операторов, принятыми другими исследователями [1, 2].

Таким образом, можно утверждать, что в области малых значений индикаторов u_i формирование сигналов управления x_i осуществляется по закону

$$\frac{dx}{dt} = T^{-1}(\varepsilon - Ax), \quad (4)$$

где $T = \begin{pmatrix} T_{o1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & T_{o2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & T_{on} \end{pmatrix}$; $\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \dots \\ \varepsilon_2 \end{pmatrix}$ — вектор малых значений индикаторов.

Возможность решения операторами гомеостатической задачи определяется возможностью получения устойчивых решений в области малых значений индикаторов согласно уравнениям (4). Необходимым условием устойчивости системы уравнений (4) является условие, при котором все коэффициенты характеристического уравнения системы (4) имели бы одинаковые знаки. Известно, что свободный член характеристического уравнения равен определителю $|T^{-1}A|$. Таким образом, если при некоторых значениях коэффициентов передачи, образующих матрицу A , ее определитель изменит знак, система уравнений (4) станет неустойчивой и гомеостатическая задача не будет иметь решения.

Отсюда следует, что существование решения гомеостатической задачи определяется лишь коэффициентами матрицы A и не зависит от индивидуальных характеристик операторов, к которым можно отнести максимальные скорости операторов v_i , постоянные времени T_{oi} и значения невязок ε_i , при которых операторы начинают согласовывать скорости сигналов управления x_i со значениями индикаторов u_i . Однако характеристики управляющих сигналов x_i как характеристики переходных процессов зависят от индивидуальных характеристик операторов. В частности, от постоянных времени T_{oi} зависит наличие колебательной составляющей в переходном процессе.

Построение кусочно-линейной аппроксимации решения гомеостатической задачи управления

Рассмотрим частный случай гомеостатической задачи, который обычно рассматривается в приложениях. Этот случай определяется условиями

$$a_{ij} = 1, a_{ij} = -a \text{ при } i \neq j. \quad (5)$$

Не нарушая общности, можно считать, что $v_i > v_j$, если $i < j$. В этом случае гомеостатическая задача имеет вид

$$\begin{aligned} u_1 &= x_1 - a(x_2 + \dots + x_n); \\ u_2 &= x_2 - a(x_1 + x_3 + x_4 + \dots + x_n); \\ &\dots \\ u_n &= x_n - a(x_1 + \dots + x_{n-1}). \end{aligned} \quad (6)$$

Можно показать, что определитель матрицы A в этом случае

$$|A| = (1 + a)^{n-1} (1 - (n-1)a), \quad (7)$$

а система уравнений (6) имеет единственное решение

$$x_i = \frac{u_i}{1+a} + \frac{a}{(1+a)(1-(n-1)a)} \sum_{j=1}^n u_j \quad (8)$$

при $a \neq \frac{1}{n-1}$ и $a \neq -1$.

Учитывая вышеизложенное, можно утверждать, что общепринятая гомеостатическая задача не имеет решения, если

$$a \geq \frac{1}{n-1}, \quad (9)$$

так как в этом случае определитель матрицы A отрицателен. Следовательно, нужно рассматривать решение гомеостатической задачи при значениях коэффициента передачи

$$a < \frac{1}{n-1}, \quad (10)$$

где n — число операторов, решающих задачу.

Кроме того, далее для определенности будем считать, что все $u_i = u$. В этом случае, если не учитывать время реакции оператора, которое является чистым запаздыванием, операторы формируют управляющие сигналы по законам $x_i = v_i t$.

Так как скорость первого оператора самая большая, он первым "обнуллит" свой индикатор со скоростью

$$v_1 - a(v_2 + \dots + v_n) > 0$$

за время

$$t_1 = \frac{u}{v_1 - a(v_2 + \dots + v_n)}. \quad (11)$$

Для удержания показания индикатора на нуле оператор должен будет уменьшить свою скорость со значения v_1 до значения $a(v_2 + \dots + v_n)$.

Легко показать, что при $v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_n$ и при выполнении соотношения (10) выполняется неравенство $v_1 > a(v_2 + \dots + v_n)$ и оператор может удерживать показания своего индикатора в нуле. Второй оператор также формирует свой управляющий сигнал по закону $x_2 = v_2 t$. При этом показания его индикатора изменяются согласно соотношению

$$u_2 = u_{o2} - v_2 t + a(v_1 + v_3 + \dots + v_n) t \quad (12)$$

при $t \leq \frac{u}{v_1 - a(v_2 + \dots + v_n)}$.

Показания его индикатора при таком законе формирования могут даже увеличиваться, если $v_2 - a(v_1 + v_3 + \dots + v_n) < 0$. В этом случае оператор стремится как можно более уменьшить увеличение своего индикатора, для чего он формирует свой управляющий сигнал с максимальной скоростью v_2 . После того как первый оператор "обнуллит" свой индикатор, и его сигнал управления начнет формироваться по закону

$$x_1 = a(v_2 + \dots + v_n) t, \quad (13)$$

показания второго индикатора начнут обязательно уменьшаться, так как

$$\begin{aligned} v_2 - a(v_1 + v_3 + \dots + v_n) &= v_2 - a(a(v_2 + \dots + v_n) + v_3 + \dots + v_n) = \\ &= \frac{v_2}{n-1} - a^2(v_2 + \dots + v_n) + \left(\frac{v_2}{n-1} - av_3\right) + \dots + \left(\frac{v_2}{n-1} - av_n\right) = \\ &= \left(\frac{v_2}{(n-1)^2} - a^2 v_2\right) + \dots + \left(\frac{v_2}{(n-1)^2} - a^2 v_n\right) + \\ &+ \left(\frac{v_2}{n-1} - av_3\right) + \dots + \left(\frac{v_2}{n-1} - av_n\right) > 0. \end{aligned}$$

Это следует из того, что каждое выражение в скобках положительно. При этом управляющий сигнал x_2 второй

оператор по-прежнему формирует со скоростью v_2 . После того как второй оператор "обнулит" свой индикатор, а это событие произойдет в момент времени

$$t_2 = \frac{u}{(1-a)v_2 - a(v_3 + \dots + v_n)}, \quad (14)$$

уже два оператора должны согласовывать скорости, с которыми они формируют свои сигналы управления, удерживая показания своих индикаторов равными нулю. Для этого их скорости формирования управляющих сигналов должны удовлетворять системе линейных уравнений:

$$\begin{aligned} v_1 - av_2 &= a(v_3 + \dots + v_n); \\ v_2 - av_1 &= a(v_3 + \dots + v_n). \end{aligned} \quad (15)$$

Как следует из соотношения (8), решение имеет вид

$$v_1 = v_2 = \frac{a}{1-a}(v_3 + \dots + v_n). \quad (16)$$

Продолжая рассуждения далее, можно утверждать, что после того как k -й оператор "обнулит" свой индикатор, что произойдет в момент времени

$$t_k = \frac{u}{(1-(k-1)a)v_k - a(v_{k+1} + \dots + v_n)}, \quad (17)$$

скорости операторов с 1-го по k -й должны удовлетворять следующей системе линейных уравнений:

$$\begin{aligned} v_1 - a(v_2 + \dots + v_k) &= a(v_{k+1} + \dots + v_n); \\ &\dots \\ v_k - a(v_1 + \dots + v_{k-1}) &= a(v_{k+1} + \dots + v_n). \end{aligned}$$

Как следует все из того же соотношения (8), решение этой системы уравнений имеет вид

$$v_1 = v_2 = \dots = v_k = \frac{a}{1-(k-2)a}(v_{k+1} + \dots + v_n). \quad (18)$$

Таким образом, при решении гомеостатической задачи оператор, имеющий максимальную скорость, должен уменьшать ее n раз. Скорости операторов, решающих гомеостатическую задачу, образуют матрицу

$$\begin{pmatrix} v_1 & a(v_2 + \dots + v_n) & \dots & \frac{a}{1-(k-2)a}(v_k + \dots + v_n) & \dots & \frac{a}{1-(n-2)a}v_n \\ v_2 & v_2 & \dots & \frac{a}{1-(k-2)a}(v_k + \dots + v_n) & \dots & \frac{a}{1-(n-2)a}v_n \\ v_3 & v_3 & \dots & \frac{a}{1-(k-2)a}(v_k + \dots + v_n) & \dots & \frac{a}{1-(n-2)a}v_n \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_n & v_n & \dots & v_n & \dots & v_n \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Последний n -й раз операторы изменят свои скорости до нуля в момент, когда последний оператор, имеющий самую маленькую скорость v_n , "обнулит" свой индикатор.

Это произойдет в момент времени $t_n = \frac{u}{(1-(n-1)a)v_n}$.

Можно показать, что при выполнении соотношений $v_1 \geq v_2 \geq \dots \geq v_n$ и $a < \frac{1}{n-1}$ выполняются соотношения

$$\begin{aligned} v_1 &> a(v_2 + \dots + v_n) > \frac{a}{1-a}(v_3 + \dots + v_n) > \\ &> \frac{a}{1-2a}(v_4 + \dots + v_n) > \dots > \frac{a}{1-(n-2)a}v_n > 0. \end{aligned}$$

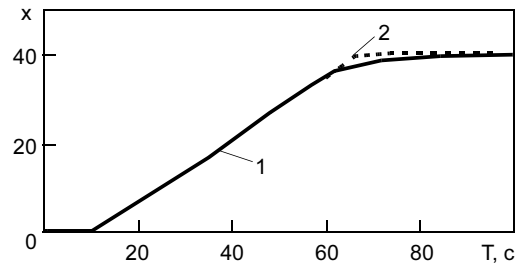


Рис. 3. Зависимость управляющего воздействия, формируемого оператором, и его кусочно-линейной аппроксимации от времени

Таким образом, предлагается кусочно-линейное приближение решения гомеостатической задачи при произвольном числе решающих ее операторов в случае, когда это решение существует. На рис. 3 представлена кусочно-линейная аппроксимация 2 кривой 1. Также необходимо отметить, что время решения гомеостатической задачи определяется деятельностью оператора, имеющего самую маленькую скорость в момент первого движения.

Выбор критериев, характеризующих совместную деятельность операторов

Гомеостатическая методика находит широкое применение при формировании рабочих коллективов. Так, в Институте медико-биологических проблем с ее использованием проводятся исследования особенностей межличностного взаимодействия в малой группе людей, находящейся в условиях длительной модельной изоляции [3]. Гомеостатическую методику применяют также при формировании локомотивных бригад на железнодорожном транспорте [4]. Несмотря на достаточно широкое применение гомеостатической методики, возникают проблемы в интерпретации ее результатов. Существует мнение, что интерпретация экспериментальных данных предопределена скорее профессиональным личным опытом, интеллектом и степенью беспристрастности исследователя, чем конкретным протоколом тестирования, четким алгоритмом обработки и документирования полученного результата. Так, в работе [3] поведение каждого оператора оценивается двумя индивидуальными показателями. WF — показатель общей индивидуальной активности, который определяется как отношение общего суммарного времени вращения оператором ручки пульта к общему времени решения задачи, и LW — показатель относительной лидерской активности, равный отношению времени, затраченного на лидерские действия, к суммарному времени активных действий оператора, причем лидерские действия — это те моменты, когда оператор вращает ручку не на уменьшение величины индикатора (что рассматривается как решение собственной задачи), а на увеличение значения индикатора (что рассматривается как желание помочь группе). Такой подход к интерпретации результатов вызывает естественные сомнения. Так, если предположить, что в работе участвует идеальный оператор, то он должен перевести управляющий сигнал x_j в то положение, которое является решением соответствующей системы линейных уравнений мгновенно и оставить его постоянным, пока все другие операторы не решат свои задачи. В этом случае показатель $WF = 0$, так как идеальный оператор переводит сигнал мгновенно и больше ручку не вращает. Показатель LW также равен

нулю, так как идеальный оператор решил свою частную задачу мгновенно и в указанном выше смысле на группу не работал. Необходимо также отметить, что применение показателей LW и WF к случаю гомеостата, управляемого кнопками, не различает операторов, так как указанные показатели равны нулю с точностью до времени реакции T_0 (действия всех операторов во время решения задачи направлены на уменьшение своих индикаторов, и они формируют управляющие сигналы все время с точностью до времени реакции).

В работе [4] гомеостатическая методика используется для формирования локомотивных бригад на железнодорожном транспорте. В этой работе число операторов ограничено двумя. Подбор операторов осуществляется по критерию решения или не решения гомеостатической задачи при вариации коэффициентов передач и их знаков. Однако, как показано выше, возможность решения гомеостатической задачи в случае кнопочного управления не зависит от индивидуальных характеристик операторов, а зависит лишь от матрицы коэффициентов передачи. Поэтому использовать такие критерии для подбора операторов в группу не представляется возможным. Для рассматриваемого гомеостата с кнопочным управлением такие критерии не разделяют операторов. Поэтому необходимо рассмотреть другие способы формирования критериев, описывающих результаты совместной деятельности операторов в малой группе.

Необходимо отметить, что в проводимом на кафедре исследовании участвовали более 50 операторов и были проведены более 700 экспериментов в группах по два и три испытуемых. По результатам экспериментов у всех операторов можно определить скорость в момент первого движения v_j , и поэтому этот показатель можно принять за характеристику оператора. Что касается определения коэффициента пропорциональности между величиной скорости сигнала, формируемого оператором, и величиной индикатора (постоянной времени T_{0i}), то эта величина уменьшается по мере обучения оператора, но, очевидно, не может быть меньше времени реакции T_0 . Таким образом, действия оператора, решающего гомеостатическую задачу, можно характеризовать как действия человека, который с оптимальной для себя скоростью приближается к реакции оптимального оператора — ступенчатому сигналу. В этом смысле оператора можно рассматривать как оптимальное звено, имеющее ограничение по скорости. С этой точки зрения лидером является тот оператор, который имеет самую большую скорость в момент первого движения. Его индикатор первым обратится в нуль, его реакция ближе всех к реакции идеального оператора. Таким образом, можно констатировать, что реакция оператора в гомеостате с кнопочным управлением близка к переходному процессу в релейной следящей системе, имеющей ограничение по скорости и выполняющей переходное движение за кратчайшее время. В качестве характеристики групповой деятельности можно рассмотреть интегральную характеристику модуля разности между желаемым и реальным процессами сигналов управления, формируемых операторами:

$$I_j = \int_0^{\infty} |x_{\text{opt}} - x_j| dt,$$

где в качестве x_{opt} можно рассматривать точное решение гомеостатической задачи (8).

Таким образом, деятельность группы из n операторов

характеризуется вектором $I = \begin{pmatrix} I_1 \\ \dots \\ I_n \end{pmatrix}$. Причем указанные

интегралы достаточно рассмотреть лишь на интервале времени T , большем, чем интервал времени, на котором решит гомеостатическую задачу оператор, имеющий минимальную скорость. Указанные интегралы могут быть нормированы величиной начального значения индикатора u , а также временем T . Очевидно, что минимальное значение координаты вектора I соответствует тому оператору, который первым "обнулит" свой индикатор и, следовательно, имеет максимальную скорость, а максимальное значение координаты этого вектора соответствует оператору, который сделает это последним и имеет минимальную скорость. Для вычисления вектора, характеризующего групповую деятельность, в сопровождающем комплекс "Гомеостат" программно обеспеченные должны быть разработаны соответствующие алгоритмы. Однако ситуация может быть упрощена, если учесть, что кусочно-линейное приближение решения гомеостатической задачи дает однозначную зависимость между значениями координат вектора I и временем, в течение которого оператор "обнуляет" свой индикатор t_j . Это время может быть непосредственно определено в ходе эксперимента. Однако, так как зависимость $x_j(t)$ является случайной функцией времени, в качестве критериев, определяющих групповую деятельность, очевидно, следует рассматривать либо корреляционные функции соответствующих интегралов, либо их математические ожидания и средние квадратические отклонения.

ВЫВОД

В работе на основе экспериментальных данных предлагается математическая модель деятельности группы операторов, решающих гомеостатическую задачу с кнопочным управлением. Существование решения гомеостатической задачи управления зависит от коэффициентов передачи a_{ij} с i -го сигнала управления на j -й индикатор, образующих матрицу A . Решение гомеостатической задачи управления не существует, если определитель матрицы A отрицателен. Возможность решения гомеостатической задачи не зависит от индивидуальных характеристик операторов и поэтому не может служить критерием для комплектации рабочих групп операторов. Характер деятельности операторов при решении гомеостатической задачи соответствует оптимальному решению этой задачи при наличии ограничений на скорости сигналов управления. Предлагаются векторные критерии, характеризующие деятельность операторов в группе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цибулевский И. Е. Человек как звено следящей системы. М.: Наука, 1981.
2. Человеческий фактор / Под ред. Г. М. Сальвенди: Мир, 1991. Т. 3.
3. Еськов К. Н. Исследование межличностного взаимодействия с помощью компьютеризированного варианта методики "Гомеостат" // Авиакосмическая и экологическая медицина. 2005. Т. 39. № 2.
4. Нерсесян Л. С. Психологическая совместимость. М.: Реинформ, 2004.

А. В. АНОСЕНКО, аспирант, Н. Я. СМИРНОВ, канд. техн. наук
"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского

Предпосылки и проблемы повышения устойчивости функционирования систем информационной поддержки процессов принятия решений в экстремальных ситуациях

Введение

Возрастающая наукоемкость современного производства и управления, проникновение в них во все большей степени интеллектуальных систем свидетельствуют о необходимости производить обработку не только определенных совокупностей информационных данных, но и совместную структурно-функциональную обработку знаний, связанную с информационно-аналитической поддержкой управленческой деятельности органов государственной власти в сфере экономики федерального и отраслевого уровней. Это требует повышения эффективности применения вычислительной техники в составе мониторинга информационно-телекоммуникационных систем (ИТКС), функционирующих в условиях воздействия или негативно влияющих (возмущающих — ВФ) и/или позитивно влияющих (ПФ) факторов различной природы.

Актуальность решения данных задач связана с необходимостью повышения качества удовлетворения изменяющихся информационных потребностей пользователей (ИПП) в трудноразрешимых (экстремальных) ситуациях.

Отличительной особенностью исследуемого типа систем является их ориентация на применение как в традиционных (обычных) условиях, так и в условиях экстремальных (чрезвычайных — ЧС, штатных — НС) ситуаций (ЭС).

Для этих ситуаций характерны следующие особенности:

- слабо прогнозируемый и в подавляющем большинстве случаев неструктурированный характер воздействия ВФ на один или несколько объектов;
- сложность формирования информационной поддержки из-за невозможности выявления и сбора первичной информации с приемлемыми для конечных пользователей (КП) значениями показателей ее качества — оперативности, достоверности, полноты, релевантности;
- отсутствие априорно разработанных сценариев разрешения ЭС;
- невозможность определения в оперативном режиме прямого и косвенного ущерба;
- отсутствие "наработанных" технологий нейтрализации или ослабления воздействия ВФ различной природы;
- необходимость экстренного привлечения материальных, энергетических и финансовых ресурсов без точного обоснования и расчетов;
- опасность создания условий для вторичных воздействий ВФ в неопределенное время и в неопределенном месте;
- наличие различного набора приоритетов у разных лиц, принимающих решения (ЛПР), и, как следствие, различных сценариев и механизмов разрешения экстремальных ситуаций;
- неоднозначный характер влияния приоритетов одних ЛПР на другие и т. п.

Применение систем в этих условиях связано с необходимостью их адаптации к динамике изменений ИПП

и воздействию ВФ путем развития алгоритмической, информационной и программно-технической платформы, а также на основе повышения квалификации лиц, готовящих решения, и эксплуатационного персонала и КП.

В свою очередь для выполнения этих требований необходимо поддерживать устойчивое функционирование вычислительной среды (ВС) информационно-аналитических систем (ИАС), входящих в ИТКС и обеспечивающих необходимый уровень качества удовлетворения ИПП.

Предпосылки и проблемы создания и применения системы

Основными критериями оценки качества удовлетворения ИПП различных структур государственной власти федерального, отраслевого и регионального уровней являются своевременность, полнота, достоверность и аналитичность результатов расчетов.

Многолетний опыт проектирования и эксплуатации ИАС данных уровней государственной власти позволил выявить основные причины снижения качества удовлетворения ИПП.

Во-первых, снижение качества результатов расчетов происходит из-за несоответствия друг другу цели управления, состава ИПП, качества первичных информационных данных и, как следствие, релевантности этих расчетов, представляемых пользователям. Во-вторых, полнота первичных информационных данных несвоевременно обеспечивается абонентами системы, в-третьих, результаты расчетов, получаемые путем содержательной обработки разнородной по источникам, формам и периодичности первичной информации и представляемые пользователям, формируются в ряде случаев без применения необходимого набора средств "алгоритмического и модельного" сервиса. В-четвертых, устойчивость функционирования ИАС не во всех ситуациях поддерживается на необходимом уровне вследствие применения ограниченного состава технологического программно-технического сервиса, обеспечивающего диагностику и оперативное восстановление неработоспособных компонентов системы.

Помимо этого, функционирование системы в указанных условиях порождает ряд несоответствий и ограничений, проявляющихся прежде всего в непрерывно изменяющихся ИПП и недостаточной полноте, оперативности, достоверности и уровне агрегации первичной информации и, как следствие, низком уровне интеллектуализации (аналитичности) результатов расчетов, выполняемых в системе и представляемых КП.

Эксплуатация ИАС в этих условиях характеризуется вследствие этого высокой динамикой, неравномерностью и неоднородностью обрабатываемых информационных данных, а также неоднозначным характером оценки текущих состояний управляемых объектов и складывающихся ситуаций для лиц, готовящих (ЛПР) и принимающих (ЛПР) решения.

В совокупности последствия возникающих нарушений взаимодействия приводят в ряде случаев к потере устойчивости функционирования (УФ) системы, характеризующей способность выполнять предписанные ей функции с заданным уровнем качества в течение допустимого интервала времени в условиях неопределенности состояний ее компонентов и проявления НС.

Кроме того, необходимость описания сложных процессов принятия макроэкономических решений и проведения стратегического интеллектуально-информационного анализа требует разработки методов, включающих мыслительные процессы информационной поддержки процессов принятия решений (ИПППР). Эти процессы не могут быть количественно определены в логических моделях. До сравнительно недавнего времени точные методы и мыслительные процедуры, которые выражались в некоторых, имевших мировое значение решениях, оставались непостижимыми и не могли быть применены для качественного семантического анализа.

Многие эксперты полагают, что динамические процессы, которые помогают объяснить изменение и развитие национальных и мировых событий, непостижимы ввиду необходимости предварительного выявления и последующего учета существенных факторов и их взаимосвязей, влияющих на качество ИПППР.

Для профессионалов в области стратегического анализа и участников подготовки решений на национальном уровне объяснение сложности препарирования событий как непостижимой проблемы неприемлемо. Аналитики в сфере безопасности и/или интеллектуального анализа обязательно должны осознать состав и взаимосвязи компонентов природы макроэкономических и стратегических событий и, что более важно, аналитических процессов, которые помогают выделить тенденции и последствия происходящих событий с учетом выявленных взаимосвязей.

Часто неопределенность превалирует над знаниями процессов стратегического анализа, которые могут привести к успешным решениям. Нечеткость и неопределенность решений, принимаемых государственными органами, вызываются не их ошибками, а ошибками при выборе методов, используемых аналитиками, ЛГР и ЛПР.

Для этого необходимо обеспечить реализацию принципов системного подхода. Как правило, основные компоненты системы ИПППР функционируют противоречиво и стратегический информационно-интеллектуальный анализ становится необходимым, когда наблюдается негативное влияние их на стабильность и безопасность национальной экономики [1—4].

Несмотря на различные точки зрения относительно того, какой компонент и какого элемента составляет главный сегмент национального потенциала, время и события показывают, что он на самом деле является композицией или сочетанием всех ее элементов. Перекос в пользу развития одного из элементов в ущерб двум другим может привести в результате к длительной депрессии национальной экономики.

Анализ взаимосвязи этих элементов показывает динамику воздействия одного (одних) на другой (другие) с учетом их общей взаимосвязи. Эти взаимосвязи формируют ядро стратегического интеллектуально-информационного анализа и процессов подготовки решений национального уровня [5—9].

Следовательно, аналитики, ЛГР и ЛПР должны осознавать, что изменение в одной компоненте всегда вызывает изменения, часто непредсказуемые и неопределенные заранее, в другой. Для них наиболее существенным

является поддержание единообразия и качественной обоснованности структуры, названных компонентов и простоты понимания применяемой методологии.

Одним из методов для оценки состояний и складывающихся для ЛГР ситуаций является применение методологии ситуационного подхода, основанного на априорных процессах рубрикации, идентификации, формирования альтернативных вариантов ИПППР и выбора рационального из них в соответствии с целями управления и с учетом существующих ограничений, вызванных прошлой, текущей или будущей ситуацией [7].

Следует также иметь в виду, что традиционно ИПП федерального уровня управления в большинстве случаев реализуются путем решения некоторого набора функциональных задач (ФЗ).

Результаты анализа состава и уровня аналитичности результатов решения свидетельствуют о предельно высокой степени их разобщенности и отсутствии реализации некоторой единой идеологии разработки, эксплуатации и развития.

Из анализа результатов расчетов этих задач также следует, что существующей и в ряде случаев очевидной необходимостью учета взаимосвязей одних задач с другими пренебрегают. Это происходит в основном из-за отсутствия учета взаимосвязей в содержательных постановках задач и технических заданиях на их разработку или комплексов ФЗ в составе ИАС.

Основные положения экономической теории и здравый смысл свидетельствуют о необходимости на макроуровне управления решать преимущественно задачи взаимовлияния, взаимодействия одних структурных единиц соответствующей предметной области на другие, решение которых основано на балансовых методах, прогнозировании, оценках риска и ситуационном подходе.

Упреждающая роль прогнозных краткосрочных и долгосрочных оценок всегда была приоритетной и имеет также важное значение на современном этапе — переходном, сопровождающемся экстремальными ситуациями.

В практике проектирования АСУ различного назначения реализация подхода "от информационных потребностей пользователей" в ряде случаев не осуществляется.

Ограничениями реализации такого подхода, по мнению авторов, являются:

- отсутствие адекватного текущему состоянию управляемых объектов состава первичных информационных данных традиционно "жестко" сформированных априори на этапе разработки ФЗ;
- "жесткий" состав ФЗ, изменение которого ограничено составом первичных информационных данных, содержащихся в априори созданной базе данных (БД) (составом ее показателей);
- ограниченная степень "начинки", вычислительной среды ИАС математико-алгоритмической компонентой;
- несовершенство информационных технологий сбора и предмашинной подготовки данных, снижающих достоверность, оперативность и полноту информации в БД, представляемую абонентами системы и др.

Таким образом, приведенные ограничения сдерживают внедрение прогрессивных методов формирования ИПППР, содержащих "сквозные" задачи цикла управления с высокоаналитичными результатами их решения.

Кроме того, отсутствие в ряде случаев плановой и учетной информации необходимой полноты и достоверности не позволяют провести ключевые оценки в сфере макроэкономики типа: "спад", "развитие", "стабилизация" и др.

Оценки развития/спада, основанные на сравнении текущих значений показателей с аналогичными показателями предыдущих лет и применяемые в статистике, требуют обязательного учета фактических изменений социально-экономических, политических и других условий, соответствующих прошлым и существующим (сравниваемым), на анализируемом интервале времени.

Отсутствие такого учета приводит к ситуации, когда негативные результаты "сваливаются" на трудности переходного периода, негативное проявление политических решений, недостаток финансовых средств и т. п., а на самом деле могли бы быть объяснены на основе содержательной целевой обработки ретроспективной информации и объявленных текущих и перспективных целей деятельности.

Наличие приведенных проблем приводит в ряде случаев к экстремальным ситуациям и создает для пользователей системы (конечных пользователей и эксплуатационного персонала ИАС) НС.

Под НС понимается ситуация, способ разрешения которой на начало ее проявления пользователям неизвестен и/или на основе априорной информации за допустимый интервал времени не найден. Эти ситуации характеризуются нетрадиционными для пользователей системы причинами возникновения, проявлениями и действиями при их разрешении.

Возникновение НС происходит, кроме того, из-за изменения состава и характера задач, решаемых для конечных пользователей, обусловленного необходимостью ликвидации негативных последствий в управляемых объектах предметных областей (ОПО), а также из-за сбоев, отказов различных компонентов вычислительной среды и персонала ИАС [6].

Эти ситуации приводят к нарушению установленного (штатного) человеко-машинного взаимодействия и из-за неоднозначного восприятия и высокой сложности складывающихся ситуаций к возможным ошибкам в действиях пользователей, ЛГР, ЛПР и эксплуатационного персонала системы.

В совокупности последствия указанных нарушений приводят в ряде случаев к потере устойчивости функционирования системы, характеризующей способность выполнять предписанные ей функции с определенным качеством в условиях проявления ЭС [10, 11].

Отличие указанного свойства от широко применяемого при оценке качества функционирования автоматизированных систем свойства надежности заключается, во-первых, в том, что надежность учитывает в основном сбои и отказы вычислительной среды ИАС (ВС ИАС), связанные с влиянием только внутренних ВФ. Во-вторых, тем, что существующие методики расчета надежности допускают учет преднамеренно вносимых изменений при определении показателей надежности с некоторыми временными задержками по сравнению с моментом их внесения, а при оценке УФ — в процессе решения функциональных задач пользователей. В-третьих, применение показателей надежности вероятностной природы ограничено из-за неоднозначности восприятия и нецелесообразности их использования при разрешении сложных ситуаций в условиях дефицита времени. Принято, что восстановление в смысле надежности связано с возвратом системы к исходной структуре, а в смысле устойчивости — с достижением оперативной цели функционирования.

Таким образом, с точки зрения надежности, из двух состояний системы наиболее предпочтительным будет то, которому соответствуют лучшие значения характери-

зующих это свойство показателей (наработка на отказ, вероятность безотказной работы, коэффициент готовности и т. п.), а с точки зрения устойчивости — то состояние, которому в большей степени соответствует достижение оперативной цели функционирования (полноты, своевременности, достоверности и аналитичности результатов решения ФЗ пользователей) или удовлетворение текущих ИПП.

К наиболее актуальным задачам развития ИТКС следует отнести:

- выбор и обоснование аспектов системного анализа и принципов адаптации функционирования компонентов системы к условиям воздействия ВФ и проявления ЭС;

- исследование проблем выбора и обоснования концепций повышения устойчивости функционирования системы;

- формирование пространства показателей и критериев оценки состояний компонент системы;

- разработка методов идентификации состояний компонент системы;

- выбор и обоснование математического аппарата для моделирования процессов функционирования компонент системы;

- разработка метода повышения функциональной устойчивости (Ф-устойчивости) вычислительной среды ИАС в нештатных ситуациях;

- выбор рационального варианта ИПППР из определенного набора альтернативных;

- разработка средств повышения устойчивости функционирования управляемых компонент системы.

Рассматриваемый класс систем ИПППР (далее система) потенциально, как и многие другие, обладает свойствами конечной надежности, живучести и управляемости, гибкое использование которых на основе проектирования и применения соответствующих принципов, методов, моделей и информационных технологий может или полностью "нейтрализовать", или частично изменить (улучшить, ухудшить) последствия воздействий различных ВФ/ПФ. Для таких систем требуется целенаправленный выбор свойств и соответствующих им показателей и критериев.

Для оценки эффективности исследуемых систем целесообразно определять устойчивость их функционирования, отличающуюся от надежности и позволяющую оценивать качество функционирования системы применительно к эффективности достижения целей функционирования, поставленных конечным пользователем в текущей ситуации.

Для рассматриваемых систем классы текущих состояний ОПО, порождаемые ими ситуации для персонала системы и качество ИПППР в целом определяются типами (классами) воздействующих факторов (ПФ/ВФ), с одной стороны, и состояниями вычислительной среды и персонала системы — с другой, а также качеством работы абонентов ОПО и конечных пользователей — с третьей.

На практике функционирование системы рассматривается как взаимодействие комплекса частных алгоритмов, реализующих различные процессы управления. При этом устойчивость ее функционирования является одним из основных свойств, характеризующих качество системы, а предложенная классификация ВФ, состояний и ситуаций создает предпосылки для проведения комплексного анализа устойчивости функционирования.

В условиях ЭС применить "напрямую", например, известный инструмент обратной связи для реализации функции контроля также проблематично по вышеуказанной причине.

В большинстве практических случаев реализация функции измерения (расчета) степени достижения цели (дерева целей) также носит проблематичный характер, что в ряде случаев связано с необъективной оценкой деятельности "человеческой компоненты", т. е. с факторами "конъюнктурного" характера ЛГР/ЛПР.

С учетом этого к задачам повышения УФ исследуемого класса (рис. 1, 2) систем следует отнести:

— анализ особенностей совершенствования и использования автоматизированных систем обработки информации в условиях проявления ЭС;

— формирование концепции информационной поддержки процессов принятия решений в ЭС;

— выбор математического аппарата для моделирования процессов обработки информации в системе;

— оценку последствий ЭС и идентификацию информации, связанной с состоянием реализации функций, предписанных системе;

— выбор рационального способа восстановления утраченных в ЭС функций обработки информации и оценка эффективности реализованного варианта ИПППР.

Учитывая вышеизложенное, проблемы исследования можно свести к виду, представленному на рис. 3 и 4.

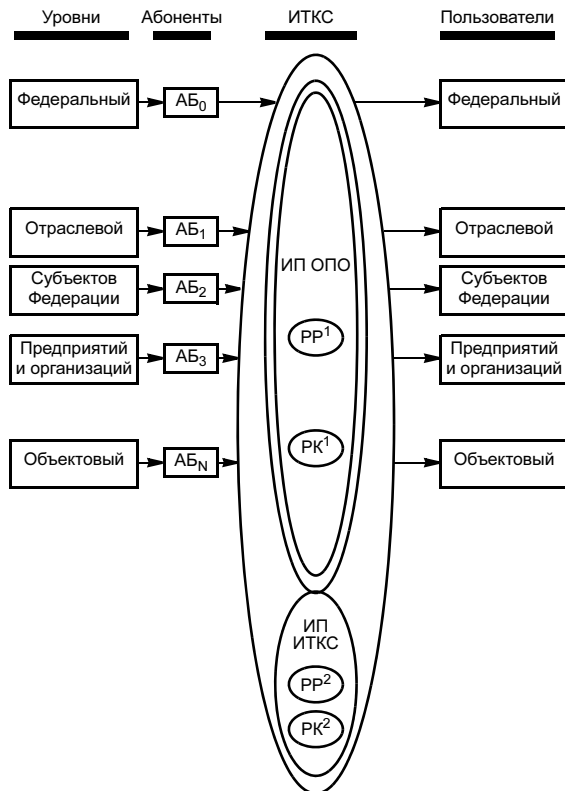


Рис. 1. Концептуальная модель системы ($АБ_0, АБ_1, АБ_2, \dots, АБ_N$ — абоненты системы, представляющие первичную информацию; PK^1, PK^2 — пространство критериев, характеризующих информационные потребности объектов предметных областей (ИП ОПО) и информационно-телекоммуникационной системы (ИП ИТКС) соответственно; PP^1, PP^2 — пространство показателей, характеризующих информационные потребности объектов предметных областей (ИП ОПО) и информационно-телекоммуникационной системы (ИП ИТКС) соответственно; ИП ИТКС, ИП ОПО — информационное пространство ИТКС и ОПО соответственно)

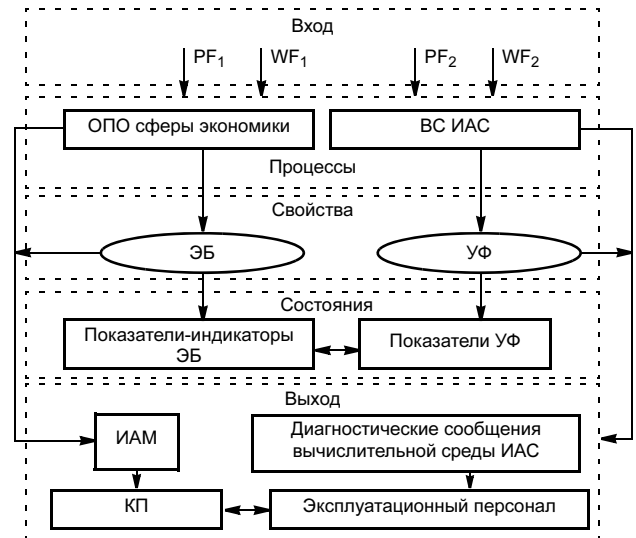


Рис. 2. Взаимосвязь аспектов исследования системы (PF_1, WF_1, PF_2, WF_2 — позитивные и возмущающие факторы, воздействующие на объекты предметных областей (ОПО) и вычислительную среду информационно-аналитической системы (ВС ИАС); ЭБ — экономическая безопасность; ИАМ — информационно-аналитические материалы)



Рис. 3. Взаимосвязь показателей, характеризующих проблемные аспекты системы ($E_0(ST), E_0(FU), E_0(RE), E_0(PR), E_0(TT), E_0(XX), E_s(ST), E_s(FU), E_s(RE), E_s(PR), E_s(TT), E_s(XX)$ — показатели, характеризующие структуру, функции, ресурсы, процессы, временной и пространственный континуум в ОПО и ВС ИАС соответственно)

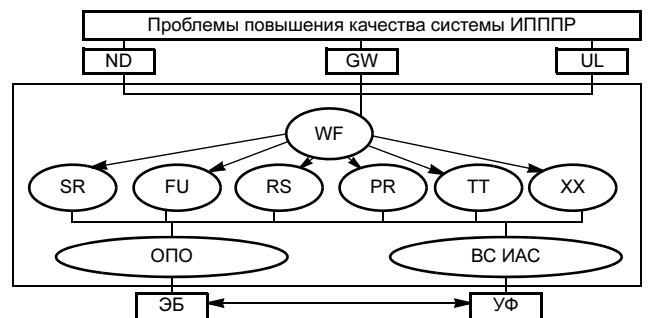


Рис. 4. Концептуальная модель взаимосвязей компонентов и свойств системы (ND — надежность, GW — живучесть, UL — управляемость, WF — возмущающие факторы, SR — структура, FU — функции, RS — ресурсы, PR — процессы, TT — временные характеристики, XX — пространственные характеристики)

Анализ традиционных подходов к решению задач повышения устойчивости систем информационной поддержки

В последнее время для разрешения слабоструктурированных проблем наряду с системным, стратегическим и количественным подходами широко применяют методы ситуационного и процессного подхода, а также метод сценариев, позволяющий построить технологию формирования сценария управления ситуацией и на ее основе оценить наиболее вероятный ход развития событий, возможные последствия принимаемых решений и обеспечить более высокую вероятность сведения ожидаемых потерь (ущерб) к минимуму [2].

В настоящее время известны следующие основные способы формирования ИПППР:

- экспертная классификация объектов;
- парные сравнения и ранжирование альтернатив;
- экспертная классификация векторов предпочтений;
- дискретные экспертные кривые и средняя точка;
- теория лотерей и метод Черчмена—Акофа;
- получение согласованного мнения ЛПР (метод

Делфи);

- повторяющаяся процедура независимых сценариев;
- использование матриц взаимодействия Гордона;
- метод Тагучи (технология TQM);
- метод аппроксимации страт;
- метод аналитической иерархии;
- методы, построенные на теории корреляционного

и регрессионного анализа и др.

В работе [10] отмечается необходимость применения для разрешения исследуемых проблем принципов стратегического управления, предполагающих определение целей системы, программно-целевое планирование (стратегическое, тактическое) и, в частности, осознание и четкое формулирование проблемы, научно-аналитическое предвидение и разработку стратегии, учет и согласование внешних и внутренних факторов, соответствие стратегии и тактики, приоритетность человеческого фактора, соответствие стратегии имеющимся ресурсам и технологиям и др. Традиционно ИПП федерального уровня управления в большинстве случаев реализуются путем решения некоторого набора запросов и решения функциональных задач.

Анализ результатов решения данных задач свидетельствует о высокой степени их разобщенности и в ряде случаев об отсутствии однозначной идеологии разработок, внедрения, эксплуатации и развития. Общепризнанным подходом к разработке управленческих решений является подход, включающий основные этапы, приведенные на рис. 5. Построение систем ИПППР ориентирует лишь на общие подходы к их созданию и вследствие этого требует целенаправленной ориентации разработок к фактическим или ожидаемым условиям функционирования как управляемых объектов предметных областей, так и вычислительной среды ИАС.

Одной из недостаточно полно и конструктивно разработанных является проблема, связанная с построением технологии формирования информационных потребностей конечных пользователей. Проблема повышения устойчивости функционирования в силу человеко-машинной природы АСУ включает подпроблемы, связанные с машинной компонентой, и проблемы, связанные с участием ЛГР, ЛПР, экспертов и эксплуатационного персонала ИАС.

В цикле управления экономическими проблемами федерального и отраслевого уровней к настоящему вре-

мени машинной компонентой реализованы лишь те функции управления, которые удалось структурировать (учет, контроль и частично прогноз и анализ), а большая часть функций (целеполагание, семантический анализ, выбор предпочтительных признаков и критериев, хеджирование, выбор и принятие решения, оценка эффективности реализованных решений и др.) все еще или слабо структурирована, или относится целиком к неструктурированной проблеме и является исключительно прерогативой человека. Из этого следует, что для повышения устойчивости функционирования системы ИПППР в экстремальных ситуациях необходимо разработать методы и соответствующие информационные технологии как для машинной компоненты, так и для специалистов — ЛГР/ЛПР.

Для структурированной компоненты разработано большое число методов, и для исследуемой проблемы необходимо лишь обосновать критерии и признаки их целенаправленного выбора и технологии применения в условиях ЭС. Решение же проблем, связанных с неструктурированной ("человеческой") компонентой при существовании методов их разрешения, сдерживается в силу повышенной сложности и неприменимости ко многим прикладным задачам формирования.

Опыт разработки ИАС федерального и отраслевого уровней свидетельствует также о необходимости разработки методических материалов формирования состава и характера ИПП, ориентированных на определенные типы (классы) пользователей как по различным классам ОПО, так и одним и тем же ОПО, но для разных ЛГР/ЛПР и типов ЭС. Поэтому уровень типовых проектных решений необоснованно низок, что повышает непроизводительный расход ресурсов и в целом снижает устойчивость системы ИПППР.

Сложной является как сама постановка, так и решение задачи получения качественных и количественных

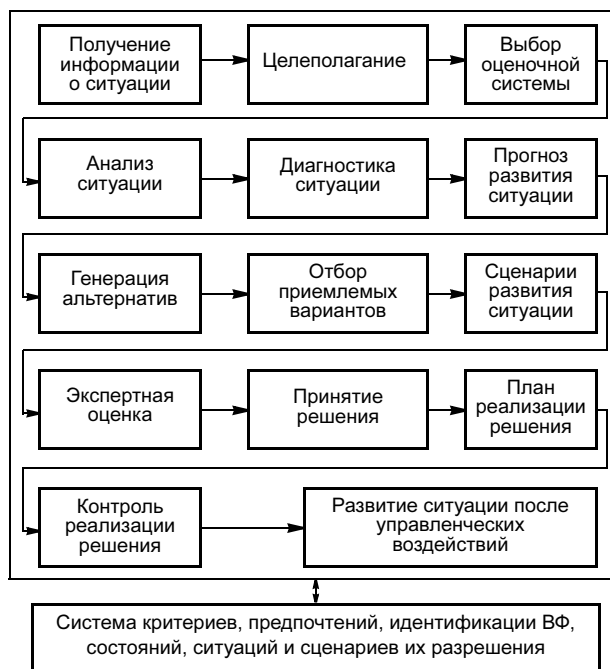


Рис. 5. Этапы разработки системы информационной поддержки принятия решений

экспертных оценок, хотя и разработано и апробировано достаточно много методов, к основным из них следует отнести следующие.

Ограничениями применения данных методов "в чистом виде" являются невозможность обеспечения сбора необходимых первичных информационных данных требуемой полноты, релевантности и оперативности, позволяющих реализовать соответствующие алгоритмы, и отсутствие в конфигурации системы программных приложений и платформ, а также доверия ЛГР и ЛПР к эффективности их применения.

Указанные ограничения существенно влияют на выбор состава функциональных задач и выявление их достаточной полноты и взаимосвязей, обеспечивающих в свою очередь заданный уровень качества ИПППР.

Так, в отдельных функциональных задачах существующая и в ряде случаев очевидная значительная взаимосвязь пространства существенных переменных одних задач с переменными других задач не учитывается. Это происходит из-за ограниченного применения методов выявления ситуационных переменных ("мозговой атаки", двухуровневого анкетирования, факторного анализа, многомерного шкалирования, моделирования ситуации и др.) и отсутствия отражения характера и методов оценки взаимосвязей в содержательных постановках ФЗ. Основные положения экономической теории свидетельствуют о необходимости на макроуровне управления решать преимущественно задачи взаимовлияния, взаимосвязи одних структурных элементов системы с другими и задачи оценки рисков и прогнозирования.

В результатах решения ФЗ в ряде случаев не содержится реализация полного цикла управления как для управляемых объектов предметных областей (например, ОПО сферы экономики федерального, регионального и отраслевого уровней), так и вычислительной среды ИАС.

Таким образом, цикл управления оказывается "разорванным".

Контрольно-учетная информация, предоставляемая пользователям, в большинстве случаев не имеет обратных связей с разработчиками ФЗ, что не позволяет осуществлять оценку эффективности формирования предоставляемых результатов решения и сдерживает дальнейшее развитие ИПППР в целом.

При этом необходимо выполнить оценку структуры и особенностей регионов, их географических и экономических различий, выявить и учесть эти различия в количественном и качественном аспектах построения ИПППР федерального уровня.

Нельзя не учитывать и того, что различия, выявленные на различных этапах разработки системы, не согласовываются с оценками регионов, территорий и отраслей, целями их функционирования и развития в рамках установленных существующими нормативными актами.

Для повышения устойчивости функционирования системы ИПППР, по мнению авторов, можно воспользоваться подходом, основанным на построении макромоделей функционирования системы и двумерных матриц: ИПП—состав первичных информационных данных; состав информационных данных—перечень ФЗ; перечень ФЗ—состав результатов их решения и др. Такой подход может быть реализован в модели иерархической системы, представленной в виде конечного множества двух смежных уровней или взаимообуславливающих друг друга подсистем — управляемой (ОПО или ВС ИАС) и управляющей (ИАС для ОПО или ПУ ИАС для ВС ИАС).

Заключение

Построение и применение систем информационной поддержки процессов принятия решений (ИПППР) высших органов государственной власти в экстремальных ситуациях требует селективного выбора методов формирования информационной поддержки и новых методологических подходов. Для повышения устойчивости данной системы актуальным является разрешение проблем, связанных с прогнозированием и выявлением механизмов возникновения, выявления и воздействия факторов негативного и позитивного характера.

Одним из важных условий обеспечения заданного конечными пользователями уровня устойчивости системы ИПППР является решение проблемы, связанной с учетом взаимосвязей ее компонент:

- управляемых объектов предметных областей;
- вычислительной среды ИАС;

— подсистемы управления вычислительной средой ИАС.

Учитывая ограниченное применение сложных аналитических моделей, устойчивость функционирования рассматриваемого класса систем можно повысить с помощью методов, позволяющих решать задачи для слабо структурированных проблем.

В связи с существенными (как правило) отличиями ситуаций, складывающихся для лиц, принимающих решения, целесообразно отказаться от "всеобъемлющего" информационного отображения управляемых объектов и взамен применить "ситуативный" подход, основанный на целенаправленном выборе существенных для текущей ситуации показателей-индикаторов и априорной разработке методов и программных средств разрешения экстремальных ситуаций различных классов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Владимиров Ю. И., Павлов А. С.* Внешнеэкономический аспект экономической безопасности Российской Федерации // *Безопасность*. 1994. № 3.
2. *Глазьев С. Ю.* Теория долгосрочного технико-экономического развития. М.: ВладАР, 1993.
3. *Красовский Н. Н.* Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Наука, 1959.
4. *Смирнов Н. Я.* Разработка средств повышения устойчивости информационных систем в сфере экономической безопасности // *Математическое моделирование и управление в сложных системах*. М.: МГАПИ, 2001. Вып. 5. 7 с.
5. *Богданов А. И.* Стратегическое управление научно-техническим прогрессом на предприятии. М.: Бином, 1991.
6. *Бутковский А. Г.* Структурная устойчивость распределенных систем. М.: Наука, 1977.
7. *Варфоломеев В. И.* Алгоритмическое моделирование элементов экономических систем. М.: Финансы и статистика, 1993.
8. *Клейнер Г. Б.* Моделирование механизма согласования приоритетов в принятии решений на предприятии / Под ред. В. З. Беленького // *Моделирование механизмов функционирования экономики*. М.: ЦЭМИ РАН, 2001. Вып. 5.
9. *Смирнов Н. Я.* Информационное обеспечение системы поддержки процессов принятия решений в сфере экономической безопасности // *Математическое моделирование и управление в сложных системах*. М.: МГАПИ, 2002. Вып. 5. 4 с.
10. *Глазьев С.* Ключевые аспекты экономической безопасности. М.: Экономика и жизнь, 1996.
11. *Клейнер Г. Б.* Моделирование механизма агрегирования приоритетов участников системы принятия решений на предприятии // *Экономика и математические методы*. 2002. Т. 38. № 3.

А. И. ОСТРОВЕРХ, канд. техн. наук, А. В. ЦЫРКОВ, д-р техн. наук
"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского

Интеллектуальная среда системы подготовки производства

Автоматизированные системы (АС), применяемые в настоящее время для решения задач технической подготовки производства, исчерпали резерв уровня автоматизации производственных процессов. Дальнейшее повышение производительности труда инженеров, занимающихся конструкторской и технологической подготовкой производства, возможно лишь на основе создания и применения нового методологического подхода в решении задач проектирования, построении программно-информационных комплексов, развивающих существующее поколение АС до уровня интеллектуальных продуктов, совершенствующих взаимодействие людей и программных средств автоматизации при выполнении функций подготовки и управления производством.

Все разработчики АС признают, что создание систем корпоративного управления производственными процессами способствует решению проблемы повышения производительности труда за счет сокращения потерь времени при обмене, исключения затрат на дублирование информации и т. п. Эта концепция предполагает разработку модели единой информационной среды (ЕИС) поддержки жизненного цикла продукции. Ключевыми направлениями построения производственной деятельности в ЕИС являются:

- применение методов информационной интеграции и системной поддержки жизненного цикла продукции на основе международных и отечественных стандартов ИПИ/CALS-технологий;
- поддержка принципов и идей менеджмента качества (стандарты серии ISO 9000:2000);
- унификация структур информационной среды систем подготовки производства и производства;
- параллельное проектирование и многопользовательские базы данных;
- ресурсное моделирование производства.

Тем не менее, в этой концепции производственные процессы разделяются на процессы инженерные и процессы корпоративного управления производством на базе стандартов MRP-II. В силу этого предприятиям при построении ЕИС приходится идти на компромисс между решениями, предлагаемыми разработчиками инженерных систем (UGS, IBM, PTC) и систем управленческих (SAP, ORACLE, BAAN). К настоящему времени сложилось общепризнанное разработчиками обеих групп систем представление о конструктивной модели изделия, которое поддерживается программными компонентами, называемыми PDM (Product Data Management). Эти программные компоненты являются связующим звеном между инженерными и организационно-экономическими системами предприятия. Функции современных PDM — сопровождение документооборота на уровне статически зафиксированных вариантов решений, что полностью удовлетворяет требованиям "докомпьютерной эры" производства. Развитие идеологии построения систем автоматизации производственных процессов требует более глубокого внедрения проектирующих комплексов в потоки конструкторской, технологической и организационно-экономической информации.

Следующее поколение автоматизированных систем должно обеспечивать создание информационной платформы, обеспечивающей:

- передачу не только готовых решений между участниками процесса, но и возможность установления активных обратных связей, автоматически организующих процессы актуализации решений при обнаружении каких-либо расхождений;
- применение проблемно-ориентированных подсистем, реализующих принципы построения решений на основе баз знаний и методов автоматического проектирования;
- объединение методик решения инженерных и организационно-экономических задач в процессах подготовки и управления производством.

Автоматизированные системы в процессах подготовки производства

В процессах подготовки производства аккумулируется большинство известных методов и приемов построения информационных и вычислительных систем. При этом следует отметить, что большим разнообразием методов отличается конструкторская подготовка производства, а большим объемом информации (в 80—100 раз) — стадия технологической подготовки производства (ТПП). Таким образом, очевидно, что наиболее эффективного приложения усилий на грядущем этапе автоматизации процесса можно достичь при решении задач именно ТПП.

При внешней схожести подходов к автоматизации решения задач проектирования конструкций и технологии реализации методов существенно отличается. Объективные особенности объектов технологического проектирования (высокая степень повторяемости элементарных фрагментов в объектах проектирования позволяет строить относительно компактные схемы классификации обрабатываемых поверхностей, видов обработки, схем процессов (способов базирования и фиксации, маршрутов и т. п.); вариантность допускаемых решений, особенно на уровне применяемого оборудования, инструмента и технологических режимов) создают условия для разработки эффективных алгоритмов решения проектных задач. С другой стороны, ряд работ в области автоматизации технологического проектирования продвинул формализацию этих процессов на достаточно высокий уровень, что создает предпосылки для разработки средств технологического проектирования, отличающихся высоким уровнем автоматизации процесса.

Среди групп автоматизированных систем, применяемых для формирования технических решений при ТПП, выделяются CAD, CAM и CAPP. CAD (*Computer Aided Design*) применяют для проектирования технологической оснастки и моделирования геометрии изделий и заготовок в производственных процессах, CAM (*Computer Aided Manufacturing*) — для разработки управляющих программ для оборудования с программным управлением, CAPP (*Computer Aided Process Planning*) — для разработки технологических процессов, их планирования и оформления в виде маршрутных, операционных и маршрутно-операционных карт.

АС различаются степенью автоматизации процессов преобразования информации (проектирования), которая во многом определяется функциональными возможностями встроенных в них моделлеров. В современных системах проектирования присутствуют два вида моделлеров: геометрические и логико-алгебраические. Последние формируют содержание (структуру) и количественные характеристики решений. Для формирования структуры решения могут применяться различные аппараты моделирования: типовые математические модели (табличные, сетевые, перестановочные, сочетательные), исчисления предикатов, генетические алгоритмы и т. п. Для расчета количественных характеристик также могут применяться различные математические аппараты, но для большинства инженерных задач, решаемых при ТПП, требуется достаточно простой, включающий арифметические, алгебраические и тригонометрические расчеты.

Технологическое проектирование

При технологическом проектировании, объединяющем общую группу методов решения задач при подготовке, мониторинге и управлении производством, можно выделить две базовые процедуры:

- определение структуры решения (структуры организационной системы, либо технологического процесса, либо структуры средств технологического оснащения);
- нормирование решения (расчет технико-экономических показателей системы либо процесса, технологических режимов, норм времени, либо конструктивных характеристик элементов СТО).

Существуют четыре базовые метода решения задач проектирования в автоматизированных системах:

1. "Диалоговое проектирование", при котором результат получается посредством выбора элементов решения из автоматизированных справочников;
2. "Заимствование" — за основу берется какое-либо решение (полностью или частично), которое затем дополняется элементами другого решения;
3. "Компоновка из готовых блоков" — блоком является функционально законченное для какого-либо свойства или их совокупности организационное или технологическое решение;
4. "Автоматическое проектирование" — повторное выполнение проектных действий с возможностью предварительного внесения изменений в окружающую процесс проектирования обстановку.

Проектирование технологического процесса (или элемента системы) заключается в формировании его описания, при автоматизированном проектировании это модель проектного решения. В общем случае процесс автоматизированного проектирования может быть представлен совместным преобразованием следующих информационных объектов: модели исходного объекта $S(A)$ и модели порождающей среды $S(P)$ с получением в результате преобразований модели проектного решения $S(T)$:

$$T = \Omega(A, P), \quad (1)$$

где Ω — определяется процедурами управления структурно-параметрическим моделированием при проектировании.

Для различных методов решения задач проектирования состав информационных объектов различается, необходимыми являются следующие:

- $S(T)$ — при неавтоматизированном проектировании (формирование описания универсальными текстовыми и графическими процессорами);

- $S(P)$ и $S(T)$ — при автоматизированном (диалоговом) проектировании;

- $S(A)$, $S(P)$ и $S(T)$ — при автоматическом проектировании.

Модель исходного объекта (МИО) $S(A)$ рассматривается как взаимосвязанная совокупность a_1, \dots, a_n элементов проектируемой системы, наделенных специфическими признаками (качественными и количественными), отвечающими за управление процессом принятия решений и называемыми при технологическом проектировании элементарно обрабатываемыми поверхностями (ЭОП) для механической обработки или "детале-операциями" (ДО) для сборки и прочих процессов. В общем случае эти элементы можно определить как элементарные проектные воздействия (ЭПВ).

Модель порождающей среды (МПС) $S(P)$ совместно с процедурами управления структурно-параметрическим моделированием Ω является информационно-алгоритмической основой построения баз знаний предметной области. Выделение МПС позволяет систематизировать процесс выделения и накопления знаний, например, в виде моделей типовых операций, объединяющих правила формирования структурных решений и расчета технико-экономических характеристик решений.

Модель организационно-технического решения $S(T)$ сохраняет в виде ссылок на МИО и МПС варианты допустимых решений, содержит информацию, необходимую для оформления документации по решению, например технологическому процессу. В модели решения хранится не только оптимальный по определенному критерию вариант, но и другие допустимые варианты реализации технологического процесса. Хранение вариантов решения необходимо по объективным причинам. Во-первых, в современных технико-экономических условиях нередко происходит смена критерия оптимальности решения или возникает необходимость комплексирования разных критериев оптимизации. При этом хранение вариантов решений обеспечивает быстрый и простой поиск нового решения. Во-вторых, выход из строя определенного элемента технологической системы может привести к невозможности реализации технологического процесса. Тогда среди хранимых решений может быть выбран другой вариант реализации технологического процесса, не использующий вышедший из строя элемент (ресурс).

Идея параллельного выполнения конструкторских и технологических работ сталкивается с проблемой частого внесения изменений в конструкцию, связанных не только с доработкой базовой модели, но и внесением изменений по требованиям заказчика. В такой ситуации МИО, являясь хранителем набора ЭПВ и обеспечивая возможность повторного "автоматического" выполнения действий проектировщика, становится, вероятно, единственным способом решения проблемы, препятствующей эффективному распараллеливанию конструкторских и технологических работ.

Для описания $S(A)$, $S(P)$ и $S(T)$ могут быть определены различные структуры объектов. Но в процессах подготовки производства очень часто результаты решения одной задачи становятся исходными данными для другой, поэтому целесообразно стремиться к применению единого представления объектов в задачах проектирования.

Степень автоматизации технологического проектирования можно в значительной степени повысить, разработав специализированные модули, обеспечивающие повтор действий проектировщика, особенно в итерацион-

ных схемах решения, которые являются неотъемлемым элементом задач подготовки производства.

Типовая подсистема проектирования

Решение типовой задачи технологического проектирования осуществляется при комплексном моделировании исходного объекта, порождающей среды и непосредственно проектного решения. Так, при проектировании технологического процесса это технологическая модель изделия, модель производственной системы и модель технологического процесса. Совокупность процедур Ω (формула (1)) реализуется в типовой подсистеме технологического проектирования (ТПТП), которая для описания $S(A)$, $S(P)$ и $S(T)$ использует аппарат структурно-параметрического моделирования (рис. 1).

В ТПТП заложена реализация элементов СМК. Последняя в типовой последовательности действий системы предполагает наличие элементов непрерывного улучшения, повышающих результативность процессов системы. Ко всем процессам по возможности должен применяться цикл "Plan-Do-Check-Act" (PDCA). Цикл PDCA можно интерпретировать следующим образом: plan (планирование) — разработайте цели и процессы, необходимые для достижения результатов; do (осуществление) — выполните процессы; check (проверка) — постоянно контролируйте и анализируйте процессы и результаты в сравнении с целями и требованиями к решениям; act (действие) — предпринимайте действия по постоянному улучшению показателей процессов.

При проектировании сложных технических систем (СТС) улучшение показателей решения может быть достигнуто при полном повторении действий проектировщика ввиду наличия взаимосвязей между локальными решениями. К числу СТС должны относиться и технологические процессы изготовления изделий авиационной и ракетно-космической техники. При этом "автоматическое проектирование" — метод решения задачи, основывающийся на повторении действий проектировщика с возможностью внесения улучшающих проектных воздействий (в зафиксированную последовательность проектных воздействий — технологическую модель изделия), соответствует идеологии процессного подхода, заложенного в основу методологии группы стандартов ISO 9000:2000, и позволяет реализовать механизм непрерывного (последовательного) улучшения проектных решений.

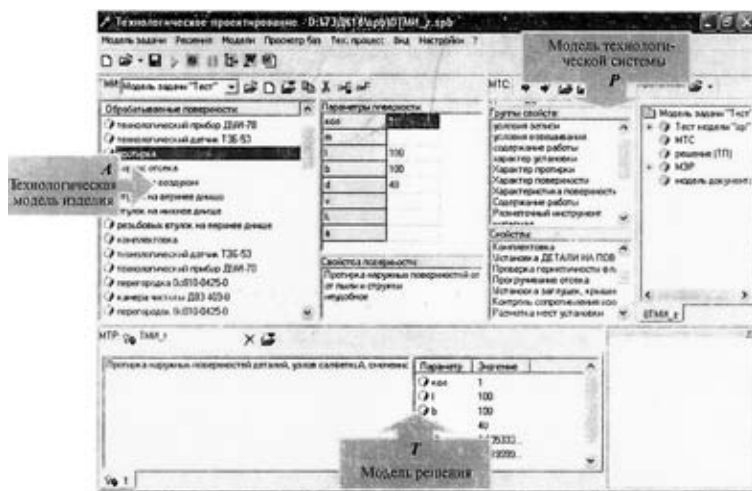


Рис. 1. Типовой модуль технологического проектирования

Организационно-экономический анализ решений

Анализ технических решений может основываться на методиках планирования операционной деятельности, которые являются основой многих программных и методических решений, применяемых в настоящее время в виде продуктов, реализующих международные стандарты MRP/MRP-II. Работы по стандартизации методик планирования продвигаются международной организацией APICS (*American Production and Inventory Control Society*). Авторитет этой организации и кропотливая работа по классификации и стандартизации функций управления основной деятельностью предприятия таковы, что сформулированные APICS стандарты:

- планирования потребностей в материалах (MRP — *Material Requirements Planning*);
- планирования ресурсов производства (MRP-II — *Manufacturing Resource Planning*),
- планирования ресурсов предприятия (ERP),
- планирования отношений с клиентами (CRM),
- планирования цепочки поставок (SCM),
- синхронизированного планирования поставщика и производителя (CSRП), широко используются как для оценки состояния планирования на предприятии, так и оценки полноты функционального наполнения (способности покрывать реальные бизнес-процессы предприятия) программного продукта, относимого к тому или иному классу систем.

В целом задачи организационно-экономического анализа решений на предприятии можно свести к следующей упрощенной схеме: выполнение заказов покупателей, обеспечение рентабельности производства, обеспечение расширенного воспроизводства.

Для выполнения заказов покупателей необходимо знать: перечень необходимых ресурсов (в натуральном и денежном выражении); когда конкретно нужны эти ресурсы; каковы источники ресурсов и мощности этих ресурсов.

Для обеспечения рентабельности производства необходимо обладать информацией: сколько стоят ресурсы; какие дополнительные издержки добавляются к стоимости ресурсов (в том числе "цена денег"); есть ли возможность снизить стоимость ресурсов и величину дополнительных издержек; сколько должна стоить продукция для того, чтобы покрыть все издержки и получить прибыль.

Для обеспечения расширенного воспроизводства необходимо иметь сведения о том, какая часть прибыли останется предприятию после налогообложения.

Применение полномасштабных систем класса MRP-II для анализа технических решений на стадии подготовки производства сдерживается недостаточной полнотой описания как объекта производства, так и самой производственной системы, поскольку внедрение инженерного решения, как правило, либо нарушает "устоявшееся" информационное поле, либо решение должно приниматься, когда это поле еще не наполнено. Поэтому в такой ситуации целесообразно применение элементов методологии проектного менеджмента (PM — *Project Management*). Управление проектами предусматривает более высокую, чем оперативно-календарное планирование степень консолидации данных — как декомпозиции работ, так и в делении изделий на компоненты. Управление проектами не предусматривает обязательного перехода к формализации структуры изделия в строгом соответствии с конструкторской документацией, не требуется и наличие

в системе первичной документации. Вместе с тем системы РМ обеспечивают достаточными инструментами для укрупненного расчета требуемых ресурсов, соблюдения очередности работ и контроля сроков их исполнения [1].

Для определения ресурсных характеристик производства (рис. 2) могут использоваться модели производственных систем предприятия, применяемые при технологическом проектировании. Входной информацией для модели являются: конструктивные характеристики изделия (масса, габаритные размеры); технологические процессы изготовления (трудоемкость, требования к исполнителям). Выходными характеристиками модели являются: вид производственного подразделения (передел, цех, участок, рабочее место); характеристики длительности работы; уровень загрузки подразделения данной работой; технологическая себестоимость продукции.

Технологическая PDM

"Технологическая PDM", реализующая технологический документооборот на интеллектуальной информационной платформе, должна стать связующим звеном между конструкторскими, технологическими, производственными и организационно-экономическими моделями объектов, обработка которых основывается на базах знаний по процессам предприятия. Технологическая PDM нового поколения должна являться средством активного представления знаний при сопровождении процессов ТПП. Единоразовно выполненные действия по формированию описания решения или выполнению расчетов необходимо фиксировать в информационных моделях, сопровождающих процессы проектирования, пополнять и обобщать при последующих применениях знаний о процессах и формируемых решениях, реализуя элементы самообучения системы, использовать для автоматического повторения проектных действий.

Информационно-коммуникационная среда системы должна организовать мультиплексный обмен данными между объектами и функциональными задачами. "Мультиплексная информационная среда" (МИС) — это технология организации многосвязанного пространства с изменяемым направлением информационных потоков [2]. МИС может охватывать весь процесс становления и развития определенной технической системы, в рамках которой создается изделие, и предназначена для управления этим процессом с целью обеспечения наибольшей эффективности использования сил и средств при решении поставленной задачи на каждом этапе жизненного цикла изделия.

Коммуникационная система МИС, реализующая возможность установления активных обратных связей, включает элементы изделия (конструкторскую спецификацию); производственную спецификацию, в которой отражаются результаты технологического проектирования; маршрутную технологию (ЭМК и КМК), объединяющую решения по локальным задачам технологического проектирования (ЗТП); состав ЗТП и компонентов (ТМИ, МТС, МТР), необходимых для технологического проектирования по элементам маршрутов.

Проблема создания интегрированных информационных систем прежде всего связана с формализацией основных этапов, стадий или фаз жизненного цикла изделия с целью упорядочения широкого круга задач, возникающих при его разработке, испытании и эксплуатации. Упорядочение совокупности задач по проектированию сложных технических систем не принадлежит к числу четко сформулированных понятий с конкретным перечнем работ. Поэтому в первую очередь необходимо разработать формальное описание рассматриваемых задач для определения структуры этого процесса и их формулировки на содержательном уровне.

Комплексность и многоплановость рассматриваемой проблемы делают переход к соответствующим моделям сложным и ответственным этапом применения аппарата общей теории систем и математического аппарата. При этом следует заметить, что обеспечить достаточную точность модели — это значит учесть все существенные связи и свойства, отвлекаясь от второстепенных, несущественных свойств. Решение этого вопроса зависит не только от характера самого объекта, но и от целевой функции каждой задачи, т. е. для одного и того же объекта может потребоваться не одна, а несколько моделей, обслуживающих различные задачи при его проектировании или исследовании. Поэтому конечной целью упорядочения совокупности задач, "функционирующих" в интегрированной информационной системе, является обоснование минимального набора математических моделей, которые обеспечиваются соответствующим формальным аппаратом.

В работах [2, 3] для организации мультиплексной информационной среды предлагается использовать аппарат структурно-параметрического моделирования. Следует отметить, что он прошел разностороннюю апробацию и адекватен решению многих практических инженерных задач. Для построения на его основе вычислительных компонентов коммуникационной среды существует необходимость доработки в следующих направлениях: поддержки распределенной вычислительной среды и разработки комплекса специальных средств управления потоками.

Задача построения мультиплексной информационной среды требует разработки механизма управления

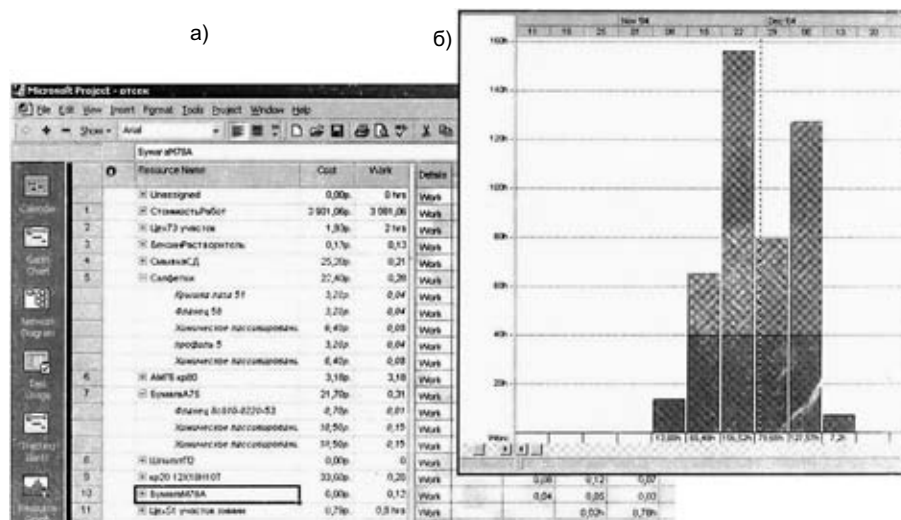


Рис. 2. Анализ состава материальных ресурсов (а) и использования организационных ресурсов (б)

информационными потоками при выполнении прежде всего вычислительных процедур. Установить заранее приоритеты в этом процессе и тем самым предопределить структуру и направления потоков сложно. Неопределенность состояния системы побуждается следующими факторами:

— процесс разработки моделей сложной технической системы предполагает постепенное наращивание возможностей, закладываемых в модели, что приводит к необходимости распределения технических знаний и связанных с ними вычислений в различных фрагментах модели объекта;

— ход выполнения работ в процессах ТПП сложно прогнозировать. Поэтому можно принять, что появление информации подчиняется вероятностным законам распределения;

— вычислительная среда становится распределенной, поэтому в структуру параметрической модели включаются параметры элементов-коннекторов, что также усложняет процесс решения задачи.

Перечисленные факторы требуют создания механизма согласования локальных решений. Удовлетворить такую потребность можно созданием комплекса процедур, обслуживающих отношения взаимосвязей параметров таким образом, что распространение значений (информационные потоки) будет направляться не только от корневой структуры, но и в противоположном направлении.

Для отработки методов работы с новой технологической PDM создан программный комплекс технологического мониторинга продукции (ТМП). Задачей ТМП является поддержка производственной спецификации изделий и реализация методов анализа (моделирования) производственных ситуаций, возникающих при выработке организационно-технологических решений. Ключевым требованием, предъявляемым к методике, является обеспечение максимально возможного уровня типизации и унификации базовых элементов системы. В основу типизации и унификации представления элементов производственной спецификации создаваемого изделия положены возможности инвариантной информационной модели типового элемента по адекватному воспроизведению организационно-технических систем в области структурных и параметрических характеристик.

Информационная модель типового элемента системы должна воспринимать конструкции производственной спецификации, являющейся объединением следующих технических документов: конструкторской спецификации; технологической спецификации; технологических маршрутов и технологических процессов; плано-экономической информации (данных мониторинга).

Как показывает анализ [4, 5], достаточно адекватным аппаратом является структурно-параметрическое моделирование. В структурно-параметрическом моделировании система объекта представляется в виде множества элементов самого объекта A , множества Φ свойств и множества R отношений между элементами, элементами и свойствами, свойствами, т. е. концепция структурно-параметрической модели

$$S(A) = \{A, \Phi, R\} \quad (2)$$

является адекватной задаче построения производственной спецификации изделия.

Технологическая спецификация или схема технологического членения отражает особенности объединения

элементов конструкции в сборочные единицы: по производственно-технологическим признакам, по последовательности подачи элементов в зону сборки. Схема технологического членения может изменяться в зависимости от ряда производственных условий, например в зависимости от серийности выпуска одного и того же изделия, и, как правило, в силу этого различной степени оснащенности производства.

Определения информационных объектов маршрутной и операционной технологий в соответствии с изложенной концепцией типовой процедуры автоматизированного проектирования сопоставляются с моделью "задача технологического проектирования", которая определяет состав информационного обеспечения процесса решения типовой задачи. ЗТП фиксирует компоненты информационной среды, участвующие в процессе проектирования для элемента системы (конструкции изделия, конкретного вида производственного процесса и т. п.). При моделировании маршрутной технологии прототипом объекта является комплексная маршрутная карта (КМК), на основе которой при каждом запуске партии деталей создается новая маршрутная карта, называемая маршрутной картой (МК), в которую копируются атрибуты КМК. При этом МК может быть скорректирована (могут быть добавлены или удалены операции).

В системе ТМП выделены унифицированные наборы организационно-экономических показателей, присущие определенным видам процессов на производственных стадиях жизненного цикла: проектирование (конструирование) элемента изделия (либо элемента технологического оснащения); проектирование технологии; реализация процесса на производстве (изготовление). Решения, получаемые в процессе технологического проектирования, привязываются к элементам изделия. К формируемой таким образом структуре, воспроизводящей конструктивную иерархию объекта, привязываются и организационно-экономические показатели производственных процессов. Эти показатели наряду с моделью ЗТП составляют основу модели вида производственного процесса, и тогда элементу модели изделия ставится в соответствие набор моделей видов производственных процессов, определяющий технологический процесс (маршрут) его изготовления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Островерх А. И., Сычев В. Н., Цырков А. В.* Реинжиниринг системы организационно-технологического сопровождения процессов производства ракетно-космической техники // *Технология машиностроения*. 2006. № 8. С. 88—91.
2. *Цырков А. В.* Методология проектирования в мультиплексной информационной среде. М.: ВИМИ, 1998. 281 с.
3. *Цырков А. В.* Структурно-параметрический моделлер — основа построения комплексных информационных моделей производственных систем // *Информационные технологии в проектировании и производстве*. 2005. № 1. С. 51—58.
4. *Технологии интегрированных автоматизированных систем в науке, производстве и образовании / Под общ. ред. А. В. Цыркова.* М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2005. 235 с.
5. *Технологии интегрированных автоматизированных систем в науке, производстве и образовании / Под общ. ред. А. В. Цыркова.* М.: ИЦ "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского, 2006. Вып. 2. 182 с.

ОБРАЗОВАНИЕ И ПОДГОТОВКА КАДРОВ

С. В. СУХОВ, д-р техн. наук
"МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского

Конкурентоспособность образовательной системы вуза

Система высшего образования России является важнейшим инновационным потенциалом развития экономики и повышения ее конкурентоспособности на мировом уровне. К началу нынешнего столетия во многих странах сформировался новый тип интеллектуальной экономики, основанной на знаниях и инновациях во всех сферах современной деятельности.

Инновации, направленные на получение и накопление новых знаний и максимально быструю их передачу в промышленную и социальную среды в форме наукоемкой продукции и услуг, становятся решающим средством конкурентной борьбы на рынке образовательных услуг. Это делает все более настоятельной и необходимой разработку качественных инновационных образовательных программ. Данное направление является приоритетным для всех российских вузов. Усиление конкурентной борьбы между образовательными учреждениями различных форм собственности и необходимость предоставления качественного современного образования ведут к организационным и управленческим изменениям на основе создания и развития новых систем и технологий управления. Так, в "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского в течение ряда лет реализуется концепция постоянного улучшения деятельности вуза на основе внедрения современных технологий обеспечения качества подготовки специалистов, базирующихся на международных стандартах серии ИСО 9001:2000. Менеджмент качества положен в основу системы управления во многих вузах. Под системой менеджмента качества понимается при этом совокупность организационной структуры вуза, документация (внутренние положения, порядок документирования процедур, методических указаний, рабочих инструкций, процессов и ресурсов), необходимых для осуществления общего руководства управлением качеством.

Особенности обеспечения качества образования в аэрокосмической области прежде всего связаны с дальнейшим усложнением проектируемых и создаваемых технических систем и комплексов, высочайшим уровнем применяемых в этой области технологий, необходимостью повышения эффективности разработок и обеспечения конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Компетентность авиационного инженера в своей профессиональной деятельности подразумевает обладание способностями к критическому, абстрактному и концептуальному мышлению, творческий подход, умение переосмыслить с одного объекта или вида инженерной деятельности на другие, т. е. обладать профессиональной мобильностью.

Высокие требования, предъявляемые современным состоянием рынка наукоемких технологий, обуславливают необходимость применения системного подхода к обеспечению качества образовательных услуг, распространяющегося на все аспекты деятельности образовательного учреждения.

Международный стандарт определяет систему управления качеством как "подход к руководству организацией, нацеленный на качество, основанный на участии всех ее членов и направленный на достижение долгосрочного успеха путем удовлетворения требований потребителя и выгоды для членов организации и общества".

Выбор такого подхода к обеспечению качества подготовки специалистов для авиакосмической области связан с универсальностью стандартов ИСО 9001:2000, которые не предлагают абсолютных измеряемых критериев качества для каждого отдельного вида продукции или услуг, а лишь задают методологию функционирования системы качества, что крайне важно для такой специфической области деятельности, какой является высшее техническое образование.

Использование требований ИСО 9001:2000 в качестве методологической основы внутривузовской системы управления качеством подразумевает, что первым и наиболее ответственным уровнем в этой работе являются стратегическое планирование и управление. Реализация функций первого уровня системы качества — стратегии управления — осуществляется совместной деятельностью ректора и ученого совета университета, которые определяют политику в отношении качества образования, внешние факторы и заинтересованные стороны вуза и на основании этого планирование актуального уровня качества образовательного процесса, обеспечение его необходимыми ресурсами, вовлечение персонала в систему качества и его

мотивацию на постоянное улучшение деятельности. Конкурентным результатом стратегического планирования стало формирование миссии университета и политики в области качества:

- развитие системы воспитательной работы, формирование социально востребованных личностных качеств, ценностей, мотивации и поведения молодежи; воспитание духа корпоративности;

- создание благоприятных социальных условий для обучающихся и работников университета на основе адресной социальной поддержки.

Политика вуза в области качества базируется на ключевом принципе реализации базовых приоритетов, когда результат должен достигаться за счет выявления требований и предвосхищения ожиданий рынка при безукоризненной реализации требований к содержанию и качеству оказываемых образовательных услуг, поставляемой наукоемкой продукции и гуманитарной деятельности университета.

В соответствии с политикой нашего вуза в области качества основными целями являются:

- формирование собственного имиджа "МАТИ"—РГТУ им. К. Э. Циолковского как вуза с мировым признанием, подтвержденным международной сертификацией системы менеджмента качества;

- обеспечение системной интеграции образования, науки и производства, включая сочетание в университете процессов менеджмента инноваций с образовательным процессом;

- реализация системы опережающего удовлетворения запросов как внешних потребителей — студентов, предприятий-партнеров и общества в целом, так и внутренних — сотрудников университета;

- обеспечение системных гарантий приобретения знаний, умений, культуры и комплексной подготовки к самореализации в обществе;

- создание условий для эффективного корпоративного управления в системе менеджмента качества при подготовке специалистов;

- обеспечение внутренних гарантий качества образовательных услуг.

Достижение этих целей невозможно без совершенствования системы менеджмента качества профессионального образования, направленной

на опережающее удовлетворение запросов потребителей образовательных услуг и создание системных гарантий приобретения обучающимися высокого уровня компонентности — умения творчески мыслить, вести научно-исследовательскую и инновационную деятельность, т. е. развитие тех самых способностей, которые становятся определяющими для специалиста в авиакосмической области.

Важнейшее значение для повышения качества высшего технического образования имеет реализация в образовательной деятельности инновационного потенциала университета. В настоящее время следует стремиться к созданию внутренней инновационно-образовательной среды, устойчивой, восприимчивой к нововведениям и способной к развитию. Одной из форм реализации инновационной образовательной программы является использование современных методик менеджмента образовательной деятельности, призванных осуществить стратегическую цель — обеспечение качества образования на основе новых подходов к повышению эффективности организации и управления образовательным процессом. Этого можно достигнуть на основе управления организационными инновациями во всех направлениях деятельности университета — учебно-методической, научно-исследовательской, хозяйственной и др. Основные мероприятия в этом направлении следующие:

- практическое решение задач совершенствования структуры вуза путем создания и реструктуризации отдельных подразделений, оптимизации схем их подчиненности и компетенции, нормативного и информационного обеспечения их деятельности;

- внедрение в управленческую деятельность методов и инструментария стратегического планирования и управления, в частности, программно-целевого планирования, проектирования организационной и академической структуры, методов оптимизации использования материальных ресурсов, управления качеством работы вуза;

- развитие новых технологий управления, в частности информационных технологий в управлении структурами вуза и филиала;

- переподготовка управленческого персонала; формирование новой генерации эффективных университетских менеджеров, использующих инновационные управленческие решения на базе новейших методических, нормативных и программных продуктов;

- конкретные технические решения в области повышения эффективности внутренней и внешней информационной структуры, включающие

модернизацию и развитие вычислительной сети вуза;

- создание корпоративной информационно-управляющей системы, обеспечивающей получение, хранение, защиту, передачу и обработку оперативной и нормативной документации как основы генерации управленческих решений.

Однако требования, предъявляемые инновационной экономикой, предполагают дальнейшее углубление в существующие проблемы управления вузами на современном этапе. Ведь главным содержанием менеджмента технического вуза должно стать управление инновациями в области технологий и образовательных программ, направленных на дальнейшее повышение качества обучения.

Данный подход позволяет сделать вывод, что управление вузом представляет открытую социальную систему, тесно связанную как со внешней, так и внутренней средой образовательного учреждения. Она включает управленческие технологии двух видов — "поддерживающие" и "подрывные", которые в своей совокупности обеспечивают поступательное движение и развитие вуза. Такой подход позволяет определить эффективные стратегические цели и реализующие ее приоритетные направления развития. Так, на достижение стратегической цели деятельности МАТИ — прогрессивное развитие университета как высшего учебного заведения исследовательского и инновационного типа направлены основные приоритеты стратегического развития, которые могут быть определены как поддерживающие и подрывные технологии управления. При этом поддерживающие технологии направлены на сохранение устоявшихся и укоренившихся приемов и методов управления, а подрывные открывают новый цикл инновационного бизнеса, поскольку они не поддерживают старые, а открывают новые технологии, способные кардинально изменить рынок.

Данная методология позволяет рассмотреть под изложенным углом зрения основные стратегические направления деятельности университета. К поддерживающим инновационным технологиям относятся следующие:

- интеграция образовательной, научной и практической деятельности по перспективным научно-образовательным направлениям на основе развития экономики знаний и сохранения традиций университета как ведущего технологического вуза;

- глубокая фундаментальная и практическая подготовка обучаемых как основной фактор повышения ка-

чества специалистов и их конкурентоспособности на рынке труда;

- удовлетворение текущих и перспективных потребностей в получении высшего профессионального образования как в Москве, так и России в целом за счет воспроизводства интеллектуального потенциала и интеллектуального продукта;

- высокое качество образовательной, научной и обеспечивающей процесс деятельности;

- определение степени удовлетворения потребностей работодателей с целью их опережения и широкое взаимодействие с ними при формировании учебных планов и программ с заинтересованными организациями и предприятиями любой формы собственности.

Данные технологические направления реализации стратегических целей университета позволяют сохранять достигнутое устойчивое состояние вуза и не предполагают выход на "подрывные" и "прорывные" технологии.

Напротив, следующая группа приоритетных стратегических технологий нацелена на реализацию новых управленческих решений, позволяющих сделать определенные прорывы к новому и на этой основе значительно повысить имидж и положение университета на рынке. К ним относятся:

- интеграция в мировое образовательное пространство путем перехода на модульный принцип построения образовательных программ, введения системы единых зачетных единиц и преимущественного перехода на двухуровневую систему подготовки;

- реализация всех уровней профессионального образования с переходом от квалификационного принципа к компетентностному;

- создание современной технологической среды, соответствующей требованиям информационного общества, для обучающихся и работников университета;

- конкретные технические решения в области повышения эффективности внутренней и внешней информационной структуры, включающие модернизацию и развитие вычислительной сети вузов, создание корпоративной информационно-управляющей системы, обеспечивающей получение, хранение, защиту, передачу и обработку оперативной и нормативной документации как основы генерации управленческих решений.

Механизмы управления инновационным образовательным процессом с позиций системы менеджмента качества могут быть следующими:

- установить критерии образовательных потребностей обучаемых и оценки их удовлетворенности с целью ориентации всего учебного про-

цесса на наиболее полное удовлетворение этих потребностей;

- обеспечить выполнение требований инновационного менеджмента к содержанию образовательного процесса — эффективность учебно-методического комплекса, компетентность и способность к нововведениям ППС, требования к среде обучения и др.;

- осуществлять координацию деятельности всех составляющих образовательной системы для решения основной задачи — приобретения необходимого уровня профессиональной компетенции;

- определить и реализовать программы по планированию, созданию и поддержанию необходимой инфраструктуры образовательного процесса;

- обеспечить результативность и эффективность образовательного процесса с помощью мониторинга и регулярного измерения показателей качества обучения;

- использовать рыночные механизмы в организации и совершенствовании системы образования (маркетинг образовательных услуг, исследование конъюнктуры рынка образовательных услуг, реклама и др.).

Требования стандарта ИСО 9001:2000 к системе менеджмента качества устанавливают необходимость менеджмента процессов жизненного цикла услуг с целью удовлетворения требований потребителей и других заинтересованных сторон. Этот принцип подразумевает обязательное оперативное планирование деятельности организации на основе процессного подхода. Такой подход позволяет представить моделируемую систему как сеть взаимодействующих процессов, описать их структуру, определить критерии эффективного управления каждым процессом и создать систему мониторинга и анализа результатов с целью их постоянного улучшения.

Оперативное планирование и управление создает второй уровень организационной структуры системы качества образования. На этом уровне непосредственно осуществляют планирование качества отдельных элементов образовательного процесса, стандартизацию, нормирование и документирование важнейших процессов, а также мониторинг и анализ информации о качестве образования. Функции оперативного планирования и управления в нашем университете реализуются Советом по качеству, который возглавляет ректор. В рамках учебно-методического управления создано структурное подразделение — отдел аттестации, аккредитации и управления качеством, являющийся исполнительным и координирующим элементом системы менедж-

мента качества. Однако самая главная роль в создании и внедрении эффективной системы управления качеством принадлежит персоналу вуза. Структурные подразделения университета формируют цели своей деятельности и цели процессов, находящихся под их управлением, направленные на:

- обеспечение управляемых условий, необходимых для реализации всех процессов жизненного цикла;

- обеспечение результативности выполнения процессов, находящихся под их управлением;

- оценку своих видов деятельности с точки зрения требований и ожиданий каждой из заинтересованных сторон.

Безусловно, основным бизнес-процессом вуза является образовательный процесс, связанный с подготовкой квалифицированных и компетентных специалистов, конкурентоспособных на отечественном и мировом рынках. С учетом сложившейся организационно-управленческой структуры университета образовательный процесс может быть представлен в виде последовательности следующих процессов:

- исследование рынка образовательных услуг;

- разработка учебного плана направления или специальности;

- создание учебно-методического комплекса направления или специальности;

- довузовская подготовка;

- прием на обучение;

- планирование ресурсов учебного процесса;

- обучение и мониторинг;

- дополнительное образование;

- итоговая аттестация (рис. 1).

Каждый из этих процессов представляет цикл, включающий обязательные для достижения эффективности и удовлетворенности заинтересованных сторон этапы деятельности, — определение целей процесса; планирование и проектирование ресурсов, технологии реализации и методов контроля; реализацию процесса; мониторинг хода реализации; анализ результатов выполнения процесса; сравнение результатов и поставленных целей; разработку и внедрение мероприятий по улучшению.

Так, на начальном этапе описания одного из важнейших процессов образовательной деятельности — разработки учебного плана, были сформулированы цели этого процесса: формирование технологической основы образовательного процесса на основе сбалансированного состава дисциплин и оптимальной последовательности их изучения; конкретизация по содержанию и объему вариативной части основной образовательной программы — национально-регионального компонента, элективных и факультативных дисциплин, а также создание документированной организационно-методической базы для образовательной деятельности структурных подразделений университета. Определялись также результаты выполнения (выходы) проектируемого процесса — учебный график на весь срок обучения по данной образовательной программе и учебный план, оформленный в виде текстового документа и утвержденный ректором.

Следующим этапом описания процесса разработки учебного плана стало определение взаимодействий процесса с поставщиками и потребителями, как внешними, так и внутренними. При этом были установлены требования к элементам входа процесса, которыми являются требования к содержанию и условиям реализации основной образовательной программы, предусмотренные Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования (ГОС ВПО), и результаты процесса "Исследование рынка образовательных услуг" в виде выявления требований предприятий-потребителей к составу и содержанию элективных дисциплин и дисциплин специализации. Также сформированы требования к качеству результатов выполнения процесса, которые должны обеспечить результативность и эффективность процесса разработки учебного плана специальности или направления.

Особенности деятельности университета как сложно организованного системного объекта — иерархичность структуры, многофункциональность и непрерывное развитие, многочислен-

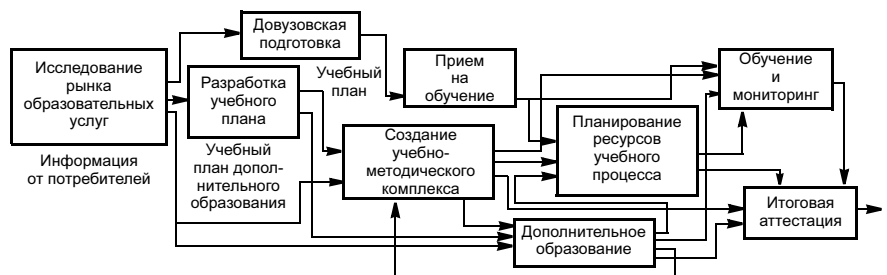


Рис. 1. Сеть процессов системы менеджмента качества университета

ность связей и пересечение целей деятельности отдельных структурных элементов — создают существенные сложности как при проектировании, так и при внедрении и дальнейшем совершенствовании системы управления качеством. Повысить эффективность таких работ позволяет использование инструментальных средств для моделирования и реинжиниринга деловых процессов, в частности CASE-технологии для функционального моделирования процессов деятельности.

Согласно п. 0.2 ИСО 9001:2000, "деятельность, которая использует ресурсы и управляется с целью преобразования входных данных в выходные данные, может рассматриваться как процесс. Часто выходные данные одного процесса непосредственно формируют входные данные следующего". Это в полной мере согласуется с методологией функционального моделирования IDEFO, где процесс представлен в виде блока, который преобразует входы в выходы при наличии необходимых ресурсов (механизмов) в управляемых условиях (см. рис. 1).

В основе функционального моделирования с помощью методологии IDEFO лежит графическое представление моделируемого процесса деятельности. Реализуемый проект в нотации IDEFO представляет совокупность иерархически упорядоченных и взаимосвязанных диаграмм (рис. 2). Результативность использования CASE-технологии в разработке системы менеджмента качества определя-

ется прежде всего возможностью автоматизации проектных процедур. Наиболее эффективна автоматизация при декомпозиции основных процессов жизненного цикла. При этом проектируемая или улучшаемая система сохраняет целостное представление, в котором все составляющие элементы взаимосвязаны. Использование современных методов анализа и проектирования процессов деятельности позволяет во многом автоматизировать разработку и внедрение системы менеджмента качества в сфере образования, а также повысить эффективность управления.

Таким образом, процессный подход на основе категорий менеджмента качества при проектировании образовательного процесса позволяет установить критерии и методы, необходимые для обеспечения его эффективности, и возможности управления качеством его реализации. Можно полагать, что идентификация и управление системой взаимосвязанных процессов, моделирующих деятельность организации, могут в целом повысить результативность деятельности в удовлетворении запросов потребителей и выполнении их требований.

Системы менеджмента качества в настоящее время внедряют многие вузы страны, руководствуясь также и стандартами ИСО 9001:2000. Однако во многих случаях они либо отождествляются, либо подменяют собою общую систему управления институтами и университетами. Так, представленная ниже схема вполне может характеризовать систему управления университетом в целом. При этом возникает вопрос: а может ли даже самая совершенная система управления качеством заменить менеджмент целого вуза? Какое соотношение существует между ними, какая связь, если это разные понятия?

Нам представляется, что систему управления качеством необходимо не отождествлять, а рассматривать в системе менеджмента университета. Но в то же время она должна обладать своими особенностями и характеристиками. Прежде всего, как это и указывается в стандарте ИСО 9001:2000, система управления каче-



Рис. 3. Система менеджмента вуза

ством должна быть тесно связана с рынком, его мониторингом, рыночными категориями, т. е. речь идет о связи системы управления качеством с рыночным управлением — маркетингом.

Отсюда следует трехступенчатая многоуровневая система менеджмента вуза (рис. 3).

Таким образом, систему управления качеством необходимо рассматривать в системе маркетинга, которая, в свою очередь, является важной составной частью общего менеджмента вуза.

Методологическую основу различия всех этих понятий образуют основополагающие категории маркетинга и менеджмента качества, которые являются инновационными.

Открытые еще в 70—80-е годы прошлого столетия и не востребованные в период инновационного кризиса в нашей стране, они сейчас все больше привлекают внимание ученых и практиков. Такими инновационными понятиями являются норма потребительской стоимости, позволяющая измерять степень удовлетворенности продуктом и услугой, процессом или их отдельными свойствами каждого конкретного потребителя, а также связанные с нею категории потребительской оценки, качество как модифицированная форма потребительской стоимости.

В условиях инновационной стратегии качество образовательных услуг и процессов может обеспечиваться как за счет "поддерживающих", так и "подрывающих" технологий. Они дают возможность вузу либо постоянно и стабильно существовать в занятой доле рынка, либо перейти на новые уровни развития, что, правда, связано с определенными рисками. Разрабатываемая в МАТИ концепция по совершенствованию системы управления качеством направлена на обеспечение инновационного развития как важнейшего фактора конкурентной борьбы.

Закон РФ «О высшем и послевузовском профессиональном образовании»

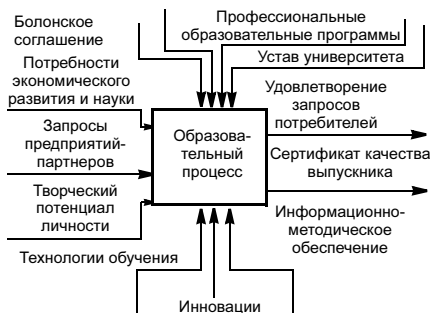


Рис. 2. Контекстная диаграмма образовательного процесса в нотации IDEFO

Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 29.06.2007. Подписано в печать 17.08.2007. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.-печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 17,42. Заказ 09/07.

Отпечатано в типографии издательства "Фолиум", 127238, Москва, Дмитровское ш., 58, тел./факс: (495) 482 5590.

Подписные индексы журнала "Технология машиностроения":

79494 в каталоге Агентства "Роспечать"

27869 в Объединенном каталоге "Пресса России"

60190 в каталоге "Почта России"