



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
Р. С. Голов
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. Суслев*

Редактор-переводчик

Е. О. Егорова

Корректор

Т. В. Арбузова

**11 (65)
Ноябрь
2007**

УЧРЕДИТЕЛЬ:

Издательский центр

"Технология машиностроения"

Журнал издается при содействии

Министерства промышленности

и энергетики РФ,

Министерства образования и науки РФ,

Российской инженерной академии,

Союза машиностроителей России,

ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

Адрес для корреспонденции:

129626, Москва, а/я 01

Контактный тел.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru

(с пометкой для журнала

"Технология машиностроения")

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

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

Свидетельство о регистрации ПИ № 77-7779

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

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

- Куценко А. И., Гурдин В. И., Жеребцов С. Н., Крупенков А. Н. — Влияние модифицирующих добавок лантана на микроструктуру и фазовый состав сплава ЖС6-У 5
- Жеребцов С. Н., Гурдин В. И., Куценко А. И., Крупенков А. Н. — Влияние добавок нитрида циркония на структуру и свойства сплава ЖС6-К 6

ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- Чертов В. М. — Совмещение закалки и правки заготовок из тонколистовой высокопрочной стали 8
- Чертов В. М. — Новые способы цинкования 10

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

- Иванов В. С., Зубков Н. Н., Иванов Д. В. — Анализ кинематики процесса циклоидального формообразования при получении щелевых структур вращающимся лезвийным инструментом 13
- Носенко В. А., Носенко С. В., Жуков В. К. — Глубинное шлифование плоских поверхностей заготовок из титанового сплава с непрерывной правкой круга 15
- Гузев В. И., Дерябин И. П., Кожарина О. А. — Моделирование точности многопереходной обработки отверстий 21

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- Кирилин Ю. В. — Сравнение стохастического и детерминированного способов определения динамической характеристики тяжелых фрезерных станков 25
- Смирнов В. А., Кирьянов А. Г., Лукин Л. Л. — Влияние эксцентриситета шлифовального круга прямого профиля на показатели процесса плоского периферийного шлифования 28

МЕХАНОСБОРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

- Решанов В. А. — Механизированная и автоматическая сварка двухкорпусных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров вместимостью 50 000 м³ в условиях Заполярья 31

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

- Штрикман М. М. — Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 3. Промышленное применение процесса СТП 36

ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

- Архипов В. Е., Москвитин Г. В., Поляков А. Н. — Структура и свойства покрытий, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза 46

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ

- Сильченко П. Н., Колотов А. В., Мерко М. А. — Анализ влияния параметров зубчатых колес для достижения необходимых качественных показателей связанных зубчатых передач 50
- Капинос Е. Ф., Мирош Ю. М., Сухова Т. С. — Обеспечение качества измерительных комплексов аэрокосмических объектов 54

МЕТРОЛОГИЯ

- Гришин А. А. — Высокотемпературные платиновые термометры сопротивления 58

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ

- Майоров А. А. — Рентгеновское телевидение в промышленном НК 60

АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

- Марутьян С. В., Марутьян С. С., Невровский В. А. — Методы оценки нагрева длинномерных изделий при нанесении покрытий из расплава 68

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

- Чертов В. М., Потемкин П. В. — Сжатый водород — оптимальное решение 75

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА

- Капустин О. Е., Вышемирский Е. М. — Методология аттестации и сертификации оборудования для газовой и плазменной резки, применяемого при ремонтных работах на газотранспортных предприятиях 78

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

- Михалицына Ю. В., Рябкова О. В. — Формы организации труда в современном автомобилестроении 82

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

- Потапова Г. С. — Содержание зарубежных журналов 88

ИНФОРМАЦИЯ

- Иванов А. Н. — Международная выставка "Современные технологии обработки материалов, интеллектуальные системы, оборудование, приборы и инструмент" — "Технофорум — 2007" 92
- Добринский Е. С. — 2-я Международная специализированная выставка "Формы. Пресс-формы. Штампы" — "РОСМОЛД — 2007" 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
R. S. Golov
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

11 (65)
November
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,
The Union of machine engineers of Russia,
TSNIITMASH, JSC

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

Tel.: (495) 796 2491

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

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

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

Registration certificate ПИ № 77-7779

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

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

Reference to "Tekhnologiya Mashinostroeniya"
at reprint is obligatory

CONTENTS

STRUCTURAL MATERIALS

- Koutsenko A.I., Gurdin V.I., Zherebtsov S.N., Kroupenkov A.N.** – Influence of the lanthanum modifying agents on microstructure and phase makeup of the ЖС6-Y alloy 5
- Zherebtsov S.N., Gurdin V.I., Koutsenko A.I., Kroupenkov A.N.** – Influence of the zirconium nitride agents on the structure and properties of the ЖС6-K alloy 6

BLANK PRODUCTION

- Chertov V.M.** – Combination of hardening and flattening for the thing-sheet high-strength steel blanks 8
- Chertov V.M.** – Zinc plating new techniques. 10

FORMING TECHNOLOGIES

- Ivanov V.S., Zubkov N.N., Ivanov D.V.** – Kinematics analysis of the cycloidal shaping at slotted structures production by the revolving edged tool 13
- Nosenko V.A., Nosenko S.V., Zhukov V.K.** – Titanium blanks plane surface deep grinding with continuous disc dressing 15
- Gouzeyev V.I., Deryabin I.P., Kozharina O.A.** – Modelling of the holes multipass working accuracy 21

TOOLING PRODUCTION

- Kirilin Yu.V.** – Comparison of stochastic and determinate method of determining heavy miller's dynamic characteristic . . . 25
- Smirnov V.A., Kiryanov A.G., Lookin L.L.** – Influence of the straight wheel eccentricity on the factors of the surface peripheral grinding. 28

MACHINING-AND-ASSEMBLY PRODUCTION

- Reshanov V.A.** – Machine welding of the dual steel standpipe of 50.000 m³ storage capacity under conditions within the Polar circle 31

PERMANENT JOINTS PRODUCTION TECHNOLOGY

- Shtrikman M.M.** – State and progress of the leaner joints friction welding process. Part 3: Industrial application of the stirring friction welding 36

MODIFEING PROCESSES OF MACHINE PARTS SURFACES

- Arkipov V.Ye., Moskvitin G.V., Polyakov A.N.** – Structure and properties of coatings conducted by the method of self-propagating high-temperature synthesis 46

SPECIAL TECHNOLOGIES

- Silchenko P.N., Kolotov A.V., Merko M.A.** – Impact analysis of the gear parameters to achieve necessary qualitative variables for the coherent gearing. 50
- Kapinos Ye.F., Mirosh Yu.M., Sukhov T.S.** – Quality maintenance of the aerospace facilities measuring systems . . . 54

METROLOGY

- Grishin A.A.** – High-temperature platinum resistance thermometer 58

TECHNICAL DIAGNOSTICS, NONDESTRUCTIVE CHECK-AND-TESTING METHODS

- Mayorov A.A.** – X-Ray television in industrial nondestructive check-and-testing 60

PROCESSES AUTOMATION AND COMPUTERIZATION

- Marutyan S.V., Marutyan S.S., Nevrovsky V.A.** – Valuation method of long-length articles heating at melt covering . . . 68

POWER INDUSTRY

- Chertov V.M., Potemkin P.V.** – Compressed hydrogen is an optimal solution 75

STANDARDIZATION, CERTIFICATION, QUALITY SYSTEMS

- Kapustin O.Ye., Vyshemirsky Ye.M.** – Standardization and certification methodology of equipment for torch and plasma cutting practised at repair work in gas-transport enterprises 78

ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION

- Mikhailitsyna Yu.V., Ryabkova O.V.** – Forms of labour organization in modern automotive industry 82

FOREIGN EXPERIENCE

- Potapova G.S.** – Foreign journals contents 88

INFORMATION

- Ivanov A.N.** – International exhibition "Advanced materials processing technologies, intelligent machine tools, equipment, devices and instrument" – "Technoforum'2007" 92
- Dobrinsky Ye.S.** – The 2nd International specialized exhibition "Moulds. Die Moulds. Stamps" – "Rosmould'2007" . . . 97
-

А. И. КУЦЕНКО, канд. техн. наук
(Сибирский ГИУ, Новокузнецк),
В. И. ГУРДИН, канд. техн. наук
(Омский ГТУ),
С. Н. ЖЕРЕБЦОВ, канд. техн. наук
(ЗАО "ОЗСИ", Омск),
А. Н. КРУПЕНКОВ, инж.
(ООО «ПКФ "МираМет"», Омск)

Влияние модифицирующих добавок лантана на микроструктуру и фазовый состав сплава ЖС6-У

Введение редкоземельных элементов типа лантана в виде модификаторов в жаропрочные никелевые сплавы является одним из важных факторов, направленных на повышение длительной жаропрочности изделий, работающих при высоких температурах, за счет образования устойчивых фаз в структуре металла. Исследованию подвергли жаропрочный никелевый сплав ЖС6-У, полученный электрошлаковым переплавом расходного электрода в плавильной емкости под слоем защитного флюса следующего химического состава [1] (%): 80 CaF₂; 15 Al₂O₃; 10 MgO.

Модификатор La вводили в ванну жидкого металла в конце плавки непосредственно перед сливом в металлическую литейную форму. Полученный слиток имел ровную наружную поверхность без усачной раковины в верхней прибыльной части.

Проведенный химический анализ показал, что содержание основных химических элементов соответствует требованиям ТУ на данный сплав и содержит следующее количество элементов (%): 0,15 С; 9,2 Cr; 9,8 Со; 2,5 Ti; 5,3 Al; 1,1 Nb; 2,1 Мо; 0,025 Zr; 0,015 В.

Поведение редкоземельных элементов в жаропрочных никелевых сплавах определяется способностью к образованию тугоплавких химических соединений с примесями легкоплавких цветных металлов, бóльшим химическим сродством к кислороду, сере и азоту и способностью к образованию тугоплавких оксидов, сульфидов и нитридов. Установлено, однако, что это не всегда так. Форма нахождения лантана при его относительно высоком содержании в никелевом сплаве определяется не только сродством РЗМ к перечисленным элементам, но и тем, что он образует с никелем стойкие интерметаллидные соединения.

В сплаве ЖС6-У обнаружены две никель-лантановые фазы — борид NiLaB₂ и интерметаллид Ni₅La. Проведенный анализ показал, что первая фаза содержит до 58 % La, 32 % Ni и 10 % В. Растворимость легирующих элементов в этой фазе низкая — не более 0,3—0,4 %, состав фазы описывается формулой Ni_{0,52}La_{0,42}B_{1,6}. Вторая фаза является лантанидом никеля, в котором никель частично замещен ко-

бальтом, хромом и алюминием в количестве 2,8, 1,6 и 1 % соответственно.

Лантансодержащие фазы различаются по внешнему виду и травимости в различных реактивах, фаза Ni₅La вытравливается реактивами Черного и Марбле, тогда как соединение NiLaB₂ в них не растворяется [2, 3].

В изучаемых образцах фаза NiLaB₂ имеет вид округлых или вытянутых, иногда ограненных частиц серого цвета. В отличие от более светлых карбидов она практически не выступает над поверхностью шлифа. Фаза Ni₅La представляет собой бледные, едва заметные выделения неправильной формы, часто окруженные карбидами и, как правило, соседствующие с NiLaB₂.

Обе фазы непрозрачны в темном поле и изотропны в поляризованном свете, они хорошо полируются, не оставляя на поверхности шлифов характерных "хвостов", и в литом металле располагаются в междендритных промежутках, что указывает на их образование на последних этапах кристаллизации сплава. Микротвердость лантансодержащих фаз (борида и лантаноида никеля) мало отличается от матрицы (для твердого раствора), по этой причине они и не выкрошиваются при механической обработке поверхности образца.

При исследовании структуры литого металла обнаружено, что лантансодержащие фазы входят в эвтектику, содержащую по меньшей мере три фазы — NiLaB₂, Ni₅La и никелевый раствор. Фаза NiLaB₂ не только входит в эвтектику, но и присутствует одновременно в виде самостоятельных выделений, являющихся центрами зарождения эвтектики при охлаждении сплава.

При нагреве до более высоких температур (1260 и 1280 °С) обособленные (первичные) частицы фазы NiLaB₂ растворяются — они становятся тоньше и их количество уменьшается. Одновременно с повышением температуры нагрева увеличивается количество эвтектики — поле шлифа покрыто сеткой оплавленного металла. Температура начала заметного растворения обособленных частиц NiLaB₂ 1260 °С, а полного растворения — выше 1280 °С.

При закалке от 1320 °С отдельные частицы фазы NiLaB_2 не выделялись. Травление шлифов показало, что высокотемпературное оплавление начинается на границах и при 1320 °С распространяется в глубь зерен, захватывая их сердцевину.

Применение методов количественной металлографии позволило определить влияние лантана на количество лантановых фаз [3]. Содержание бориды NiLaB_2 не зависит от содержания РЗМ в готовом металле и колеблется в узких пределах 0,010—0,015 % (при содержании бора 0,010—0,015 %). Количество интерметаллидной фазы Ni_5La тем больше, чем больше лантана в металле, наиболее заметно содержание этой фазы при содержании лантана 0,02—0,05 %.

Установленное соотношение лантансодержащих фаз в различных плавках сплава ЖС6-У с содержанием лантана 0,02—0,04 % указывает на то, что лантан в первую очередь взаимодействует с бором и никелем, образуя боридную фазу NiLaB_2 , количество которой в изученных плавках практически постоянно, так как плавки не отличались по содержанию бора. Оставшаяся часть редкоземельного элемен-

та реагирует с никелем, образуя интерметаллид Ni_5La , содержание которого изменяется в зависимости от содержания лантана в металле.

Стабильное появление подобных фаз в структуре жаропрочных никелевых сплавов обусловлено их повышенной металлургической чистотой, которую обеспечивает электрошлаковый переплав с последующим вакуумным литьем, в результате этого достигается необходимый уровень физико-механических свойств и служебных характеристик изделий, выпускаемых для авиационной промышленности и машиностроения [4].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дорощенко М. М., Жеребцов С. Н., Лопавев Б. Е. Получение шихтовых мерных заготовок из литейных отходов жаропрочных сплавов электрошлаковым переплавом // Металлургия машиностроения. 2005. № 2. С. 18—21.
2. Коваленко В. С. Металлографические реактивы. М.: Металлургия, 1970. 134 с.
3. Голубцова Р. Б. Фазовый анализ никелевых сплавов. М.: Наука, 1969. 232 с.
4. Жеребцов С. И. Исследование физико-механических свойств жаропрочного сплава, подвергнутого электрошлаковому переплаву с дальнейшим вакуумным индукционным литьем изделий // Литейщик России. 2006. № 5. С. 32—34.

С. Н. ЖЕРЕБЦОВ, канд. техн. наук
(ЗАО "ОЗСИ", Омск),

В. И. ГУРДИН, канд. техн. наук
(Омский ГТУ),

А. И. КУЦЕНКО, канд. техн. наук
(СибГИУ, Новокузнецк),

А. Н. КРУПЕНКОВ, инж.
(ООО «ПКФ "МираМет"», Омск)

Влияние добавок нитрида циркония на структуру и свойства сплава ЖС6-К

В результате модифицирования значительно снижается диффузионная подвижность атомов по границам зерен. Для жаропрочных никелевых сплавов существенный интерес представляет изучение запаса пластичности изделия при эксплуатации при более низких температурах, чем температура эксплуатации лопаток газотурбинных двигателей.

Установлено, что модифицирование сплава ЖС6-К тугоплавкими наночастицами нитрида циркония ZrN в количестве не более 0,15 % более чем в 2,8—3,7 раза повышает его стойкость против высокотемпературной ползучести при 975 °С и нагрузке 230 МПа.

Результаты испытаний на растяжение образцов с добавками 0,015, 0,025, 0,08 и 0,16 % ZrN при 20 °С показали, что минимальная добавка ZrN незначительно повышает предел прочности сплава σ_B , который при дальнейшем увеличении содержания

ZrN в сплаве остается постоянным. При этом модифицирование практически не влияет на величину предела текучести $\sigma_{0,2}$. Однако удлинение δ оказывается довольно чувствительным к модифицированию и в сплаве с содержанием 0,1—6,0 % ZrN возрастает по отношению к немодифицированному сплаву более чем на 60 %. Подобный эффект модифицирование оказывает на сужение сплава ψ , возрастающее более чем на 70 %.

Модифицирование сплава ЖС6-К приводит к существенным изменениям в его микроструктуре. С повышением содержания ZrN в сплаве заметно возрастает средний размер его зерна. При содержании модификатора 0,16 % средняя площадь зерна оказывается почти в 2,8—3,5 раза выше, чем в немодифицированном сплаве. Вместе с тем зерна обретают более вытянутую форму, чем зерна исходного сплава, и происходит перераспределение

частиц карбида титана TiC. В немодифицированном сплаве частицы TiC локализованы преимущественно по границам зерен. С повышением же содержания ZrN в сплаве возрастает количество частиц TiC в теле зерна.

Увеличение количества карбидной фазы в модифицированном сплаве обусловлено повышением ее стойкости против растворения вследствие плакирования частиц TiC нитридом. В результате повышения плотности частиц TiC так же, как в случае выделения дисперсной фазы из пересыщенного твердого раствора, существенно возрастает стабильность дислокационной структуры сплава.

Диффузия химических элементов сплава по границам зерен замедляется вследствие модифицирования и это может быть обусловлено понижением их (границ) диффузионной проницаемости. Поскольку величина последней находится в прямой зависимости от степени разориентации границы, ее понижение следует связать с уменьшением этой разориентации.

Установлено, что в результате модифицирования происходит смена механизма формирования вторичных границ в исследуемом сплаве. В немодифицированном сплаве образование вторичных границ происходит за счет рекристаллизационных процессов, при этом разориентация между кристаллитами достигает 25—30°. Ввод частиц модификатора существенно затрудняет процесс рекристаллизации, вследствие этого за счет полигонизации формируются малоугловые границы, разделяющие кристаллиты и разориентированные всего лишь на 5—10°. Такая трансформация высокоугловых границ в малоугловые в результате модифицирования приводит к значительному снижению активности не только мест образования центров рекристаллизации, но и потенциальных мест образования карбидов [1].

Прямым следствием рекристаллизации в модифицированном сплаве является увеличение среднего размера зерна. Тем не менее его пластичность заметно выше, чем исходного сплава с более мелкозернистой структурой. Разориентация субзерен, сформировавшихся при полигонизации, оказывается достаточной для дробления зерен, полученных пластической деформацией и связанного с этим снижения степени зернограницного проскальзывания.

Поскольку преимущественное распределение частиц хрупкой фазы по границам зерен приводит к снижению пластичности материала, немаловажным фактором, определяющим ее повышение для сплава ЖС6-К при модифицировании, является перераспределение частиц карбидов и возрастание их количества в теле зерна. При этом снижение удельной доли частиц карбида титана на границах зерен связано не только с утратой границами активности как потенциальных мест их зарождения,

но и с общим уменьшением протяженности границ вследствие увеличения размеров зерен.

Структурным условием максимальной пластичности сплавов является близость величин среднего размера зерна и среднего расстояния между частицами. В сплаве ЖС6-К размер зерен заметно больше среднего расстояния между частицами при повышенных значениях пластичности, в связи с этим можно предположить, что упомянутый критерий может быть применен для случая соизмеримости расстояния между частицами со средним размером субзерна, наблюдаемым в исследуемом сплаве.

Вместе с тем механические свойства сплава и, в частности, его пластичность определяются стабильностью имеющегося в кристаллической решетке ансамбля дислокаций, который препятствует развитию процесса макроскопического скольжения. Превышение определенного критического напряжения приводит к быстрому образованию первых локализованных полос скольжения. Их образование инициируется лавинным процессом, в ходе которого множество дислокаций скольжения, проходя через кристалл, разрушают его дислокационную структуру, оставляя за собой практически свободные от дефектов каналы. Они ограничены стенками дислокаций высокой плотности, внутри них содержится лишь несколько дислокаций, которые могут перемещаться при гораздо более низких напряжениях, чем в матрице с ненарушенной дислокационной структурой [2, 3].

Наличие бездислокационных каналов в кристаллите является причиной локального размягчения внутри них и уменьшения механических свойств сплава. Присутствие дисперсных частиц в матрице сплава существенно стабилизирует его дислокационную структуру. Увеличение количества частиц карбидов в теле зерна при модифицировании сплава ЖС6-К способствует перераспределению деформации во множество ручьев, что принуждает "работать" значительно большую часть материала, чем в исходном немодифицированном сплаве. В результате повышения однородности деформации наблюдается макроскопическая картина общего увеличения пластичности сплава.

Таким образом, модифицирование сплава ЖС6-К тугоплавкими частицами существенно влияет на формирование микроструктуры и субструктуры материала [3]. Вследствие этого одновременно достигается значительное повышение жаропрочности сплава и его пластичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мальцев Н. В. Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964. 214 с.
2. Бабаскин Ю. З., Шипицын С. Я., Афтандиянц Е. Г. Экономное легирование стали. Киев: Наукова думка, 1987. 185 с.
3. Сабуров В. П. Разработка и внедрение технологии суспензионного модифицирования стали и никелевых сплавов: Дис. ... д-ра техн. наук. Свердловск, 1991. 471 с.

В. М. ЧЕРТОВ, инж.
Филиал ДониФЦ

Совмещение закалки и правки заготовок из тонколистовой высокопрочной стали

Сохранение формы стальных листовых заготовок в процессе закалки всегда являлось трудной задачей. Легированная конструкционная сталь при закалке в воду, масло или другую закалочную среду претерпевает превращения, основное среди которых мартенситное, сопровождающиеся объемными изменениями, термическими и структурными напряжениями и, как следствие, деформацией и короблением изделий. Особенно это относится к заготовкам из тонколистовой стали толщиной от 4 до 15 мм. Поэтому приходится принимать специальные меры: опускать изделия в закалочный бак в вертикальной плоскости, зажимать их в специальных приспособлениях или производить закалку под прессом. Даже в этих условиях справиться с короблением изделий удается не всегда и требуется последующая правка вручную, под прессом или в специальных вальцах. Эти приемы усложняют и существенно удорожают производство листовых заготовок, особенно сложной формы, высокой твердости, малой толщины или больших размеров.

Первые работы по практически бездеформационной закалке листовых штампов сложной формы (спинки кресел летчиков из броневой среднеуглеродистой среднелегированной стали) провели С. Т. Кишкин и Н. М. Скляр в Подольске в 1937—1938 гг. [1]. Необходимость установки бронеспинок в самолетах для наших летчиков — участников войны в Испании — диктовалась большими потерями летного состава от немецких истребителей. Броневые спинки имели сложную форму, соответствующую форме кресла и спины летчиков. Вдобавок, с целью повышения их пулестойкости толщина спинок менялась от середины к краям. Разработанная броневая сталь после закалки обладала весьма высокой прочностью, порядка 2000—2050 МПа. Максимальное неприлегание заготовок бронеспинок к шаблону допускалось не более 0,5 мм. Традиционный способ штамповки нагретой заготовки с немедленной последующей закалкой оказался непригодным из-за недопустимых искажений формы. Закалка в штампах, куда помещались нагретые штамповки, также не дала положительных результатов: после выхода из штампов обнаруживалась чрезмерная "поводка" из-за больших остаточных напряжений.

Исполнители интуитивно, основываясь на своем опыте, приняли неожиданное и неординарное решение: производить правку штампованных заго-

товок, ускоренно охлаждаемых почти до температуры начала фактической закалки — температуры мартенситного превращения. По мнению автора, они первыми обнаружили и использовали эффект пластифицирования стали в момент мартенситного превращения. Повышенная пластичность в момент превращения аустенита в мартенсит обуславливала релаксацию (снижение) возникающих напряжений. Это и обеспечило минимальные поводки бронеспинок и предотвратило их хрупкое разрушение при правке. Успешное решение этой проблемы позволило затем впервые приступить к изготовлению целого ряда корпусных деталей самолетов — штурмовиков конструкции С. В. Ильюшина из листовых броневых заготовок высокой прочности и сложной формы.

Можно считать, что С. Т. Кишкин и Н. М. Скляр впервые реализовали низкотемпературную термомеханическую обработку стали при температуре закалочной ванны, близкой к температуре начала мартенситного превращения [2]. Следует учесть, что это относится к высокопрочной стали, приобретающей после закалки твердость выше 50 HRC.

Впоследствии Н. М. Скляр признал [3], что исполнители серьезно опасались возникновения чрезмерных закалочных напряжений в хрупкой закаленной высокопрочной стали, что в процессе закалки, совмещенной с правкой, могло привести даже к опасному разлету обломков.

Позднее, в середине XX века М. Е. Блантер теоретически обосновал явление аномальной пластичности при аустенитно-мартенситном переходе, а его ученик А. К. Машков практически применил это явление на ряде заводов Западной Сибири. Используя эти данные, оказалось возможным разработать технологию бездеформационной закалки дисков трения из стали 30ХГСА, также приобретающей после закалки высокую прочность. Заготовки дисков диаметром 350—520 мм вырубали из листа толщиной от 4,5 до 7,0 мм и традиционно закачивали в масло в свободном состоянии. Деформацию заготовок как по форме, так и по плоскости пытались исправлять при среднетемпературном отпуске пакетов на приспособлении в сжатом состоянии. Деформация готовых дисков оставалась настолько большой, что все заготовки — а они при правке пружинили — приходилось долго и с большим трудом править вручную на плите при помощи кувалды, что

создавало неприемлемые условия для работающих в цехе.

Изучение опыта других предприятий показало, что на Уралвагонзаводе (Нижний Тагил) применяли прогрессивную технологию закалки на механизированной линии с нагревом дисков током промышленной частоты и закалкой под прессом. Особенно процессом являлось прижатие нагретых дисков под прессом с одновременной подачей закалочного масла. Отсутствие коробления по плоскости сопровождалось недопустимо высокой деформацией по окружности: до 30 % дисков приобретали форму эллипса, выходящую за пределы допуска на механическую обработку. Это являлось следствием протекания мартенситного превращения под нагрузкой, ведущего к появлению остаточных напряжений высокого уровня.

Группа технологов родственного предприятия разработала другую технологию [4]. Нагрев и закалку дисков производили в полуавтоматической установке током повышенной частоты (8000 Гц) от машинного генератора ВПЧ-100-8000. Нагрев выполняли с одной стороны через кольцевой индуктор. Для равномерного нагрева по окружности было предусмотрено вращение диска. Сквозной равномерный прогрев диска обеспечивался подстуживанием — разрывом по времени между окончанием нагрева и подачей закалочного масла. Масло подавали под давлением 3—5 МПа в виде душа через многочисленные отверстия в верхней плите штампа.

После подачи масла прижатие диска верхним самоустанавливающимся штампом производилось только в момент начала мартенситного превращения, т. е. собственно начала закалки. Время запаздывания определяли экспериментально по результатам замера твердости через каждую секунду подачи масла. Общее время подачи масла устанавливали, исходя из времени охлаждения диска до безопасной для прикосновения температуры.

Отработанные режимы закалки дисков: усилие пресса 2200 Н, напряжение под нагрузкой 800—550 В, ток возбуждения 3 А, время нагрева для дисков толщиной 7 мм 55 с, толщиной 4,5 мм — 45 с, зазор между индуктором и диском 6—8 мм, время передачи от индуктора под пресс 6 с, температура масла 40—80 °С, подача масла до зажатия под прессом (подстуживание) через 4—6 с, общее время закалки в масло 50 с.

Коробление по плоскости дисков после такой закалки практически отсутствовало. Более того, неплоскостность заготовок до термической обработки, равная 0,3 мм, после закалки уменьшалась вдвое. Деформация по окружности — незначительная. После такой закалки отпуск производили на приспособлении без фиксации. Правка дисков как опе-

рация полностью исключалась, так же как и применение громоздких приспособлений, фиксирующих сжатые диски при отпуске. Дополнительные преимущества — отсутствие обезуглероживания поверхности, равномерная и стабильная твердость закаленных и отпущенных дисков, оптимальная микроструктура — мелкоугольчатый отпущенный мартенсит.

Впоследствии ЦНИТИ упростил схему закалки, установив мощный электромагнит в масляной закалочной ванне. В момент начала мартенситного превращения и появления ферромагнетизма диски прижимались к нижней плите с меньшим усилием без применения пресса, что обеспечивало их бездеформационную закалку.

При приобретении закалочного пресса фирмы "Глиссон" для шестерен диаметром 500 мм было обнаружено аналогичное явление: изготовители пресса применили пульсирующее прижатие верхнего закалочного штампа при подаче масла. Это способствовало снижению деформации шестерен и сохранению биения начальной окружности в пределах, заданных чертежом. Иначе говоря, в этом прессе тоже было учтено явление аномалии пластичности в процессе мартенситного превращения.

ВЫВОДЫ

1. Практически подтверждено явление аномальной (повышенной) пластичности легированной конструкционной стали при превращении аустенита в мартенсит (приоритет этого открытия принадлежит выдающимся российским металловедам XX века С. Т. Кишкину и Н. М. Склярову).

2. Применение способа закалки тонких листовых заготовок из легированной конструкционной стали, при котором деформация (правка) или прессование (штамповка) производится именно в момент проявления достаточной пластичности, позволяет существенно уменьшить коробление и снизить стоимость изделий за счет исключения операции правки изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гриневич А. В.* Вклад С. Т. Кишкина в разработку авиационной бронезащиты // Научные идеи С. Т. Кишкина и современное материаловедение. М.: ВИАМ, 2006. С. 175—179.
2. *Высокопрочные конструкционные стали* / А. Б. Шалькевич, Н. Г. Покровская, Н. Г. Орехов, А. Ф. Петраков // Научные идеи С. Т. Кишкина и современное материаловедение. М.: ВИАМ, 2006. С. 193.
3. *Скляров Н. М., Каблов Е. Н.* Материалы — Победе! // Полет. 2005. № 5. С. 89—91.
4. *Медник Б. М., Федулеев Ю. А., Чертов В. М.* Высокочастотная бездеформационная закалка деталей // Литейное и кузнечное производство. Омск: ОмГТУ, 1996. С. 16—18.

В. М. ЧЕРТОВ, инж.

Центр содействия развитию (Москва)

Новые способы цинкования

15—18 мая 2007 г. на ВВЦ прошли 5-я Международная специализированная выставка "Антикор и Гальваносервис" и научно-практическая конференция "Современные методы и технологии защиты от коррозии в нефтегазовой отрасли и энергетике". На конференции были представлены сообщения о новых технологических процессах нанесения антикоррозионных покрытий, в частности цинкования.

Горячее цинкование — это процесс нанесения цинка из расплава на стальные изделия. Температура расплава 440—450 °С при температуре плавления цинка 419 °С.

Компания ООО "Восток ЦМ" (Москва) представила сообщение о поставляемых ею высокопроизводительных линиях и технологии горячего цинкования металлоконструкций различного назначения. Линия включает системы очистки воздуха и используемых жидкостей, ванны травления, оборудование для горячего кислотного обезжиривания, промывки, флюсования с подогревом, печи горячего цинкования, сушильную камеру и ванну охлаждения. На всех этапах цикла надежные методы очистки выбросов защищают работников и окружающую среду. Процесс горячего цинкования длится несколько минут, но является относительно энергоемким, поэтому обрабатывают большое количество изделий при высокой производительности. К преимуществам процесса относятся отсутствие отслоений покрытия и водородного охрупчивания изделий, долговечность покрытия (срок службы при средней интенсивности коррозии в зависимости от условий эксплуатации более 30 лет). Толщина цинкового покрытия от 70 до 150 мкм, причем к изделию примыкает сплав цинка с материалом изделия, имеющий повышенную твердость, а наружный слой — чистый цинк. Эффективность этого способа подтверждена на предприятиях России и за рубежом с 1998 г. При уточнении применимости способа для различных изделий и марок стали установлено, что повышенное содержание в стали углерода и кремния препятствует нанесению качественного покрытия. Очевидно, причиной этого явления при повышении содержания углерода является неблагоприятное влияние структуры (образование карбидов или мартенсита, в зависимости от твердости), а при повышенном содержании кремния — образование прочной оксидной пленки, препятствующей сплавлению цинка со сталью. Кроме того, процесс неприменим для высокопрочных стальных изделий, температура отпуска которых после закалки не превы-

шает 300—350 °С: высокотемпературный нагрев при горячем цинковании недопустимо снижает прочность и пластичность.

Подобное оборудование и технологию представила на выставке голландская фирма CIC International, имеющая офис в Москве. Кроме линий горячего цинкования по технологии Galvalusion без кислотного травления фирма поставляет автоматические линии цинкования малых деталей, размещаемые на площади 14 × 12 м, предназначенные для метизной продукции и высокопрочных болтов.

На конференции сообщение о термодиффузионном способе нанесения цинковых покрытий представила фирма ООО "РемЭнергоТон" [1]. По этому способу цинкование производят в барабанах, наполненных порошковой смесью, содержащей цинк, при температуре 360—480 °С. Толщина покрытия от 5 до 150 мкм — зависит от состава, объема смеси, температуры и времени процесса. Отмечаются высокая прочность сцепления, долговечность в агрессивных средах и повышенная износостойкость как преимущества способа по сравнению с горячим и электрохимическим цинкованием. Повышение этих характеристик объясняется образованием интерметаллидов различного состава твердостью 300—350 HV. Образование интерметаллидов происходит в приповерхностном слое изделий без значительного изменения их размеров, что при относительно небольшой толщине покрытия позволяет применять такую технологию для прецизионных изделий. Для высокопрочных метизов, применяемых при сооружении мостов (относительно высокопрочных метизов, но не изделий с прочностью более 1400 МПа), сохраняются исходные механические свойства, не происходит наводороживания и охрупчивания изделий как при электрохимическом цинковании и сохраняется геометрия резьбы, что не выполняется при горячем цинковании. Этим способом производят цинкование весьма крупногабаритных длиной до 12 м изделий, причем гарантируется равномерная толщина слоя цинка по всему изделию. Ресурс изделий — не менее 30 лет — достигается при толщине покрытия 50—80 мкм. К области неприменения данного способа все-таки придется отнести нанесение покрытий на высокопрочные стальные изделия, температура отпуска которых после закалки ниже температуры цинкования.

Фирма "Дистэк" (Челябинск) разработала процесс термодиффузионного цинкования с применением

насыщающей смеси на основе цинка, герметичного вращающегося в печи контейнера и специально сконструированной печи. Температура процесса от 330 до 450 °С, время — от 3 до 4,5 ч, толщина покрытия от 10 до 120 мкм. Покрытие пригодно для метизов, крепежа, пружинных железнодорожных клемм из стали 50, пружин из стали 50 и 60 в газовых резервуарах высокого давления, цепей, шахтных комбайнов из стали 20ХГНМА, полых деталей с глухими отверстиями и резьбой, при этом обеспечивается свинчиваемость и не изменяется их геометрия.

Способ замены токсичных дефицитных кадмиевых покрытий на комбинированные (основа — легированный цинк) разработан в ФГУП "ВИАМ" [2]. В сочетании с модифицированным фосфатным покрытием такое комбинированное покрытие по предъявляемым требованиям не уступает кадмиевому. Путем послойного осаждения получены покрытия на основе цинка толщиной порядка 9 мкм, также рекомендованные для замены кадмиевых. Слои цинка наносят в кислом или щелочном бесцианистом электролите на листовые образцы из стали 30ХГСА, обработанные на среднюю прочность порядка 1300 МПа. Следует отметить пониженные эксплуатационные и технологические характеристики примененных электролитов по сравнению с хлористо-амонийными и цианистыми. Рекомендовать эти покрытия для применения на высокопрочных изделиях, где велика опасность водородного охрупчивания, также не представляется возможным.

Приведенные результаты согласуются с данными, полученными в ВИАМе при разработке способа предотвращения водородного охрупчивания стали 30ХГСА средней прочности [3]. За нижнюю границу прочности, при которой возникает необходимость обезводородивания после цинкования в различных электролитах, авторами принято временное сопротивление разрыву, равное 900 МПа, и верхняя граница — на уровне 1420 МПа, вместо ранее принятого в нормативной документации ВИАМа нижнего уровня 1400 МПа. У подавляющего большинства исследованных — комплексных и с добавками поверхностно-активных веществ — электролитов цинкования выход по току уменьшается с 98 до 90% при повышении плотности тока от 1 до 2 А/дм². Это четко указывает на существенное увеличение выхода по водороду и рост степени наводороживания образцов и изделий. Действительно, в такой ситуации единственным выходом является проведение обезводородивания. Показано, что даже после прогрева при 150—250 °С в течение 2 ч не удается достичь не только исходного, после термической обработки, уровня относительного сужения, равно-

го 58 %, но и уровня 52 %. Лишь выдержка в течение 24 ч позволяет достичь уровня относительного сужения 55 %. Сделан вывод о допустимости прогрева при 200 °С в течение 12 ч только в случае применения щелочных цинканных электролитов цинкования "Экомет Ц1" марки А и "Карат-89". Технология термической обработки образцов традиционная: закалка в масло на мартенсит и отпуск при 400—450 °С до получения заданной прочности. Между тем известно, что такая структура сохраняет склонность к водородному охрупчиванию при отпуске вплоть до 500 °С [4].

В НПП "ЭКОМЕТ" разработана и допущена ВИАМом технология цинкования "ЭКОМЕТ-Ц1" высокопрочной стали (прочность не менее 1400 МПа) [5]. Электролит содержит оксид цинка, гидроксид натрия и блескообразующую добавку. Электролит экологически безопасен, по рассеивающей способности не уступает цианидным, толщина покрытия до 100 мкм, допускаемая плотность тока до 20 А/м². Этот электролит является гораздо менее наводороживающим, чем многие другие.

По склонности к водородному охрупчиванию высокопрочную сталь можно расположить в следующий структурный ряд: мартенсит, отпущенный мартенсит, нижний бейнит, отпущенный нижний бейнит. Этот ряд построен по результатам оценки времени растрескивания напряженных до уровня $0,9\sigma_{0,2}$ образцов очень тонкой ленты из пружинной стали *in situ*, т. е. непосредственно в процессе нанесения покрытия (кадмиевого) из цианидного электролита [6]. Разработка и внедрение в промышленность способа двойной изотермической обработки — изотермической закалки с дополнительным отпуском — пружинных шайб из стали 65Г показали следующее: после обработки структура шайб состоит из нижнего отпущенного бейнита повышенной пластичности; остаточные сжимающие напряжения не превышают 50 МПа (500 МПа после традиционной закалки в масло и отпуска); цинкование из стандартного цианидного электролита, сохраняя упругость и вязкость исходного материала, не приводит к охрупчиванию даже шайб толщиной 0,5 мм (при наличии острых кромок — концентратора напряжений) и даже без обезводородивания. Шайбы при заневоливании не ломаются. После снятия некачественного покрытия повторное цинкование не вызывает охрупчивания и поломок, даже без проведения последующего прогрева [7].

Определенные преимущества перед остальными способами имеют следующие технология и оборудование механогальванического нанесения цинкового покрытия [8]. Изделия в барабане, куда помещен водный подкисленный раствор и порошок цинка, обкатываются стеклянными шариками ма-

лого диаметра, и частицы цинка в холодную привариваются к поверхности изделий. При взаимодействии цинка с поверхностью изделий в присутствии кислоты выделяется некоторое количество водорода. Для полного исключения взаимодействия водорода с материалом изделий (в том числе с высокопрочной пружинной сталью) приходится несколько усложнять процесс: предварительно на изделия наносят тонкий подслои меди (лучше олова). В результате получается плотный слой цинкового покрытия нужной толщины (плотность и толщина слоя зависят только от времени обработки) без применения электрохимической технологии и без охрупчивания.

Таким образом, множество разработанных и апробированных в производственных условиях способов цинкования позволяют потребителю выбрать тот способ, который наиболее приемлем для обработки выпускаемых изделий с учетом как производительности и экономичности, так и технологичности и обеспечения высокого качества и надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев В. М. Термодиффузионные покрытия — надежный щит для стальных и чугунных изделий // Современные методы и технологии защиты от коррозии. М.: ВВЦ, 2007. С. 17—19. <http://remenergoton.ru>
2. Ульянов И. В., Овсянникова Л. В., Губенкова О. А. Новые защитные покрытия взамен кадмиевых // Современные методы и технологии защиты от коррозии. М.: ВВЦ, 2007. С. 28.
3. Никифоров А. А., Ульянов И. В. Влияние технологии нанесения защитных гальванических покрытий на механические свойства сталей средней прочности типа 30ХГСА // Деформация и разрушение материалов. М.: ИМЕТ, 2006. Т. 1. С. 405—407.
4. Гудремон Э. Специальные стали. М.: Гос. изд. лит. черн. и цв. мет., 1950. Т. 2. С. 1485.
5. НПП "ЭКОМЕТ": Каталог химических продуктов, технологий и оборудования. 2006. С. 16—17. <http://www.ecomet.ru>
6. Чертов В. М., Гусев А. Л. Оперативная оценка водородного охрупчивания высокопрочной стали // Методы и технические средства оперативной оценки. М.: МЭИ (ТУ), 2002. С. 155—156.
7. Чертов В. М. Технология обработки пружинных шайб // Технология машиностроения. 2005. № 8. С. 11—18.
8. Окулов В. В. Прогрессивные технологии цинкования // Совершенствование технологии гальванических покрытий. Киров: ВятГУ. 2006. С. 77—78.

Внимание! Информация

1997 ВОПЛОЩЕННАЯ ИДЕЯ 2007

**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ
МИР**
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ
ИЛЛЮСТРИРОВАННЫЙ
ПОЛНОЦВЕТНЫЙ
ЖУРНАЛ
О ПРОФЕССИОНАЛЬНОМ
ЛЮБИТЕЛЬСКОМ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ
И РУЧНОМ ИНСТРУМЕНТЕ
СТАНКАХ
ОБОРУДОВАНИИ
И ТЕХНОЛОГИЯХ

ПЕРИОДИЧНОСТЬ
6 НОМЕРОВ В ГОД
ПОДПИСЧИКИ
ПОЛУЧАЮТ В ПОДАРОК
ИСОТ КЛУБ
ИНФОРМАЦИОННО-
РЕКЛАМНОЕ
ПРИЛОЖЕНИЕ К ЖУРНАЛУ

Россия, Москва, 123022,
ул. Ходынская, дом 4,
ООО «ИСОТ КЛУБ»
Редакция журнала
«Инструментальный Мир»
тел./факс +7 (495) 252 5385
факс +7 (495) 205 8372
моб. тел. +7 928 208 3406
E-mail: isotclub@instrumir.ru
www.instrumir.ru



**ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ
МИР**
ЖУРНАЛ
WORLD OF TOOLS
MAGAZINE



WORLD OF TOOLS
IT IS AN SPECIALIZED
ILLUSTRATED, FULLCOLOR
MAGAZINE
OF POPULAR
INFORMATION ABOUT
PROFESSIONAL
AND AMATEUR
ELECTRICAL AND
HAND TOOLS
MACHINES
EQUIPMENT
TECHNOLOGY

6 ISSUES A YEAR
SUBSCRIBERS WILL
RECEIVE A PRESENT
ISOT CLUB
APPLICATION IN
MAGAZINE "WT"
FREQUENCY
6 ISSUES A YEAR

Hodinskaja street, 4
123022, Moscow, Russia,
«ISOT CLUB» Ltd
Editorial Board
«Instrumentalny Mir»
tel./fax +7 (495) 252 5385
fax +7 (495) 205 8372
mob. tel. +7 928 208 3406
E-mail: isotclub@instrumir.ru
www.instrumir.ru

Журнал «Инструментальный мир»

официальный печатный орган РАПЭ —
Российской Ассоциации
Производителей Электроинструмента

Журнал ИМ издаётся с 2003 года.
Приложение «ИСОТ клуб»
выходит с 2004 года

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

Анализ кинематики процесса циклоидального формообразования при получении щелевых структур вращающимся лезвийным инструментом

Одним из основных параметров, требующих аналитической оценки, при разработке процесса фрезерования трубчатых заготовок для получения фильтрующих труб является длина щели l_1 (рис. 1). Цель работы — выявление и анализ функциональной взаимосвязи геометрических параметров криволинейной прорезаемой щели с геометрическими параметрами схемы технологического зацепления детали и кинематическими параметрами обработки.

Зададим внешнюю схему технологического зацепления детали и инструмента. Математическая модель процесса циклоидального формообразования щели (прорези) в графическом виде приведена на рис. 2. Модель разработана на векторном представлении схемы технологического зацепления детали и инструмента и вращательных формообразующих движений. Она отражает траекторию формообразования, т. е. последовательные положения формообразующей точки профиля резца, например вершины, в координатах, связанных с деталью (центром O_d). Модель соответствует режиму фрезерования, при котором окружная скорость инструмента по абсолютной величине больше окружной скорости детали. Модель разработана в полярной системе координат, наиболее приемлемой для математического описания вращающихся объектов.

В аналитическом виде математическая модель, функционально связывающая геометрические параметры щели (радиус ρ поверхности, на которой расположена щель и центральный угол φ) с геометрическими параметрами схемы технологического зацепления и кинематическими параметрами формообразующих движений может быть представлена следующим образом:

$$\rho = R_d \left[1 - \frac{1}{2} (i_1^{-1} - 1) \left(\frac{\varphi}{1 - i_1^{-1}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где R_d — координата расположения полюса технологического зацепления относительно центра O_d детали, принятого за на-

чало полярной системы координат, равная $A + R_i$ (A — вектор расположения центра инструмента O_i относительно начала координат O_d , направленный из O_d в O_i и численно равный межцентровому расстоянию; R_i — координата расположения полюса p относительно центра O_i инструмента, численно равная радиусу инструмента, для схемы внешнего технологического зацепления $R_i < 0$); i_1 — геометрическое передаточное отношение схемы технологического зацепления, равное R_i/R_d ; φ — центральный угол отклонения радиуса-вектора формообразования от начала координат (положение

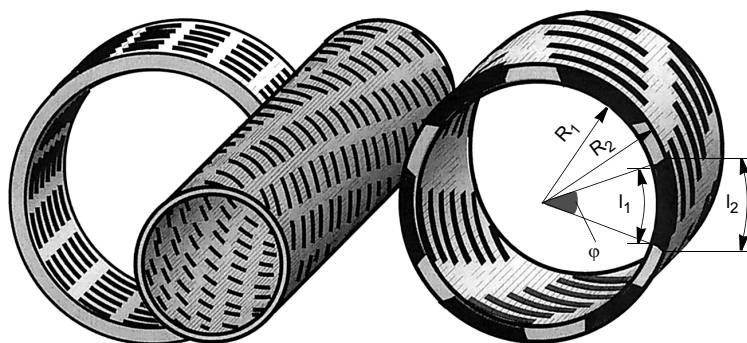


Рис. 1. Фрагменты фильтрующих труб и геометрические параметры щели

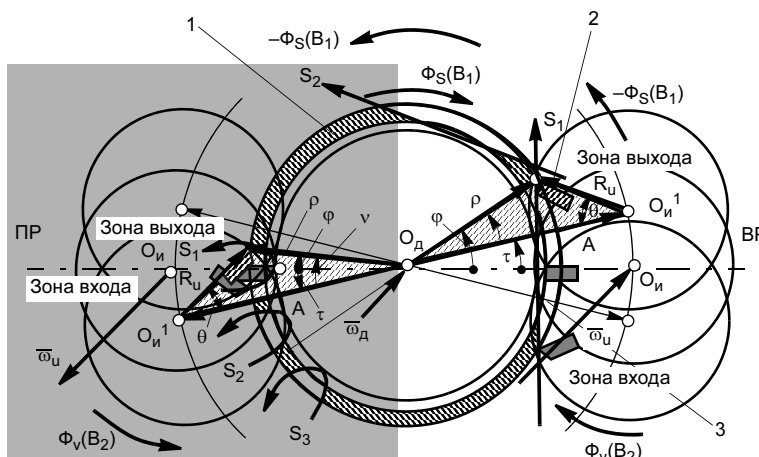


Рис. 2. Векторная модель процесса циклоидального формообразования при фрезеровании щелевых структур (ПР — попутное резание, ВР — встречное, S_1 — S_3 — траектории формообразования): 1 — деталь; 2 — инструмент; 3 — прорезь

на оси центров) в положении вершины резца на внутренней или внешней окружности профиля детали; l — передаточное отношение окружных (линейных) скоростей инструмента и детали, равное v_n/v_d или i_1/i (i — кинематическое передаточное отношение угловых скоростей вращения детали и инструмента, равное ω_d/ω_n).

Модель (1) позволяет рассчитать длину прорезаемой щели при заданной схеме технологического зацепления и кинематических параметрах обработки, а также определить геометрические параметры схемы обработки для требуемой длины щели.

Длина щели по толщине стенки трубы переменна. Так как применительно к фильтрам расчет проводили по минимальному значению длины щели, определяющему проходное сечение фильтра, то для принятой схемы технологического зацепления текущее значение радиуса формообразования принимается равным радиусу внутренней поверхности трубы $\rho = R_{d1}$ (рис. 1, 2).

Первая задача сводится к определению межцентровой длины l прорезаемой щели при заданных ρ , A , R_n , i_1 , i , l .

Длину прорезаемой щели определяли исходя из соответствующего ей центрального угла формообразования φ :

$$l = 2R_{d1}\varphi, \quad (2)$$

где угол φ определяется исходя из зависимости (1) по соотношению

$$\varphi = \left| (i_1 - i) \right| \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho}{R_d}}{\frac{1}{2}(1 - i_1)i_1}} = \left| (i_1 - i) \right| \sqrt{\frac{1 - \frac{\rho}{A + R_n}}{\frac{1}{2}(1 - i_1)i_1}}. \quad (3)$$

При $\rho_1 = R_{d1} = 22$ мм (внутренний радиус трубы), $\rho_2 = R_{d1} = 25$ мм (внешний радиус трубы), $A = 116,5$ мм, $R_n = -95$ мм (внешняя схема технологического зацепления), угловых скоростях вращения $\omega_d = 2\pi \cdot 500$ рад/мин, $\omega_n = -2\pi \cdot 500$ рад/мин при попутном резании, $\omega_n = 2\pi \cdot 500$ рад/мин при встречном резании центральный угол φ и длина прорези составляют:

для попутного резания $\varphi = 0,151$ рад, $l = 6,644$ мм;
для встречного резания $\varphi = 0,239$ рад, $l = 10,515$ мм.

Результаты сравнения показывают, что для одних и тех же исходных данных щель, полученная попутным резанием, короче щели, полученной встречным резанием.

Функциональная зависимость длины l прорези по внутренней (внешней) поверхности кольца от кинематического передаточного отношения i при заданных геометрических параметрах схемы технологического зацепления ($R_{d1} = 22$ мм, $R_n = 95$ мм) для различных значений межцентрового расстояния приведена в табл. 1 и на рис. 3, а (табл. 2 и рис. 3, б) ячейки, соответствующие приведенному выше примеру.

В табл. 1, 2 и на рис. 3 выделены области, соответствующие встречному резанию. Установлено, что кинематическое передаточное отношение i существенно влияет на траекторию формообразования, и в частности длину прорези. Длина прорези прямо пропорциональна кинематическому передаточному отношению i . При одинаковом межцентровом расстоянии A_n обработка встречным резанием обеспечивает большую длину щели, чем попутным.

Длина прорези находится в обратной зависимости от межцентрового расстояния и достигает минимального (нулевого) значения при межцентровом расстоянии, равном сумме радиальных размеров инструмента и поверхности детали. Для схемы внеш-

Таблица 1

Резание		l , мм, при				
Встречное	i	A , мм				
		117	116,5	116	115	
		i_1				
	+5 +4 +3 +2 +1	0	-4,318	-4,419	-4,523	-4,75
			18,277	26,398	39,211	
			16,336	23,642	35,1898	
14,396	20,853	31,167				
12,455	18,096	27,146				
10,515	15,310	23,124				
$\omega_n = 0$ Попутное	0	8,580	12,538	19,103		
	-1	0	6,644	9,766	15,081	
	-2		4,494	6,994	11,059	

Таблица 2

Резание		l_2 , мм, при				
Встречное	i	A , мм				
		117	116,5	116	115	
		i_1				
	+5 +4 +3 +2 +1	0	-4,318	-4,419	-4,523	-4,75
			50,783	55,101	58,566	66,788
			45,333	49,251	52,216	59,938
39,883	43,401	46,266	53,088			
34,433	37,499	40,116	46,238			
28,983	37,701	33,966	39,388			
$\omega_n = 0$ Попутное	0	23,533	25,851	27,816	32,538	
	-1	18,083	20,001	21,666	25,688	
	-2	12,633	14,151	15,516	18,838	

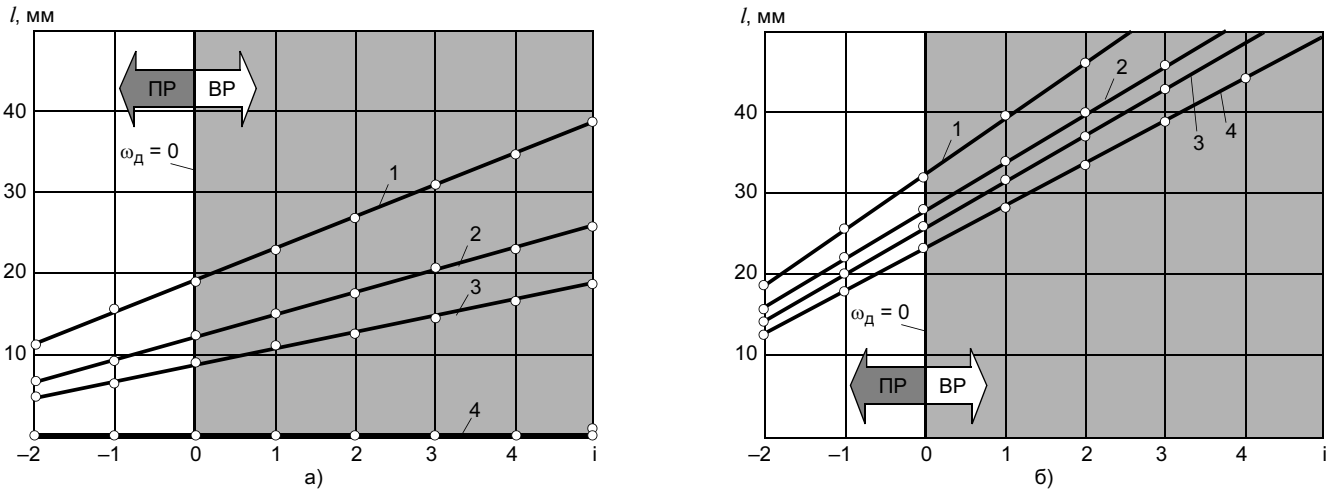


Рис. 3. Зависимость длины прорези по внутренней (а) и наружной (б) поверхностям от геометрических и кинематических параметров циклоидальной обработки: 1—4 — A равно соответственно 115, 116, 116,5 и 117 мм

него технологического зацепления длина прорези по внешней поверхности существенно превышает длину прорези по внутренней поверхности трубы.

ВЫВОДЫ

1. Разработанный принципиально новый метод анализа циклоидальных процессов формообразования деталей при лезвийной обработке базируется на векторной модели технологического зацепления и формообразующих движений.

2. Предлагаемая кинематическая модель циклоидального формообразования прорези при получении лезвийным методом щелевых структур для

фильтрующих труб позволяет рассчитывать геометрические параметры щели при заданной схеме технологического зацепления и кинематических параметрах обработки, а также определять параметры схемы обработки для требуемой длины щели.

3. Разработанный метод расчета длины прорезаемой щели учитывает как геометрические параметры схемы технологического зацепления, так и кинематические параметры формообразующих движений с учетом их взаимонаправленности. Установлено, что для одних и тех же исходных данных щель, полученная при попутном резании, короче щели, полученной при встречном резании.

В. А. НОСЕНКО, д-р техн. наук, С. В. НОСЕНКО, студент
(Волжский политехнический институт),
В. К. ЖУКОВ, инж.
(ОАО "Завод Электрон")

Глубинное шлифование плоских поверхностей заготовок из титанового сплава с непрерывной правкой круга

Титановые сплавы применяют в различных отраслях народного хозяйства и области их применения постоянно расширяются. Из сплавов на основе титана, как правило, изготавливают особо ответственные детали, к качеству поверхности которых предъявляют исключительно высокие требования. Поэтому вопросам формообразования деталей, в частности

шлифованием, уделяется большое внимание.

Одним из наиболее перспективных направлений формообразования является глубинное шлифование, сочетающее высокое качество поверхности детали с высокой производительностью и возможностью автоматизации управления. Особенно эффективным считается глубинное шлифование

с непрерывной правкой круга. Наиболее широко глубинное шлифование применяют при изготовлении деталей двигателей авиационной и космической техники из труднообрабатываемых сплавов на железной и никелевой основе [1—4 и др.]. К менее изученным процессам относится глубинное шлифование сплавов на основе титана. Особенности глубинного

шлифования титановых сплавов описаны в работах [5—7 и др.]. Даны рекомендации по выбору характеристики абразивного инструмента, СОЖ, режимов шлифования, сделан анализ обрабатываемости титановых сплавов некоторых марок, но вопросы непрерывной правки абразивного инструмента исследованы недостаточно.

Целью данной работы является повышение эффективности плоского глубинного шлифования заготовок из титановых сплавов путем оптимизации процесса непрерывной правки рабочей поверхности абразивного инструмента алмазным роликом.

Исследования проводили на станке — полуавтомате для глубинного шлифования модели ЛШ220 с мощностью привода главного движения 18,5 кВт. В качестве СОЖ использовали 2 %-ный водный раствор концентрата "Конвекс". Задача заключалась в удалении с поверхности заготовок из титанового сплава ВТ8 размером 76 × 34 и 72 × 44 мм припуска 3 мм, обеспечив при этом максимальную производительность, отсутствие шлифовочных прижогов и трещин, отклонение от плоскостности не более 0,01 мм на всей поверхности и параметр шероховатости $Ra = 1,25$ мкм. Шлифование осуществляли высокопористыми кругами 1500 × 63 × 203 64С10ВМ2-М212К производства ОАО "Волжский абразивный завод".

Как показали испытания, при глубинном шлифовании широких поверхностей необходимо учитывать также ограничение мощности двигателя. Остановка вращения двигателя главного движения при встречном шлифовании кругом характеристики 64С10М212К с минимальной скоростью подачи алмазного ролика $S_n = 0,1$ мкм/об происходила уже при глубине шлифования $t = 1$ мм. Поэтому исследования проводили в основном при обработке с попутной подачей, так как мощность шлифования в этом случае меньше, чем при встречной подаче.

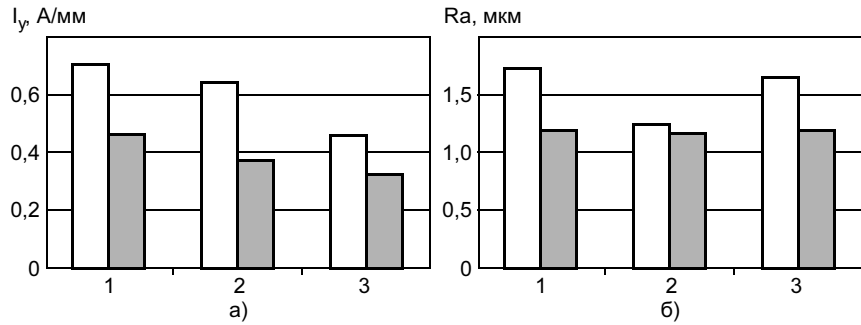


Рис. 1. Зависимость удельного тока I_y и среднего арифметического отклонения профиля Ra от направления подачи стола при обработке на различных режимах со встречной (□) и попутной (■) подачей (твердость круга ВМ2, $S_n = 0,3$ мкм/об): 1 — $v_s = 50$ мм/мин, $t = 1$ мм; 2 — 30 мм/мин, 2 мм; 3 — 30 мм/мин, 1 мм

С увеличением подачи правящего ролика и использованием более мягких кругов шлифование возможно с встречной подачей, но удельный ток двигателя главного движения I_y (величина тока) на один миллиметр ширины шлифуемой поверхности при прочих равных условиях при попутной подаче меньше, чем при встречной (рис. 1, а). Это в определенной степени связано с более высокой интенсивностью самозатачивания абразивного инструмента при попутном шлифовании.

При скорости шлифования 25 м/с взаимодействие зерна с металлом можно рассматривать как удар. Чем больше начальная глубина резания зерна, тем больше сила удара. В соответствии с кинематикой процесса фактическая глубина резания, с которой зерно входит в обрабатываемый материал при попутном шлифовании, больше, чем при встречном, соответственно при попутном шлифовании ударная нагрузка на зерно выше. Более высокая ударная нагрузка увеличивает вероятность разрушения рабочей поверхности абразивного инструмента, т. е. способствует самозатачиваемости круга в процессе шлифования. Как известно, с увеличением самозатачиваемости абразивного инструмента сила шлифования снижается [8].

Поскольку при попутной подаче доля самозатачивания выше, следует ожидать, что износ круга будет больше. Заключение об ин-

тенсивности изнашивания сделано по кромкостойкости инструмента, которую определяли по радиусу перехода от дна паза к его стенке. С этой целью образцы из сплава ВТ8 шлифовали перпендикулярно широкой стороне и в образовавшемся пазе измеряли радиус перехода от стенки к дну паза, характеризующий кромкостойкость круга. Установлено, что для всех рассмотренных режимов обработки радиус при попутном шлифовании больше, чем при встречном.

При шлифовании с непрерывной правкой после выхода из зоны резания наиболее выступающие зерна рабочей поверхности круга взаимодействуют с алмазными зернами правящего ролика. В результате правки крупнозернистый алмазный ролик формирует развитый рельеф рабочей поверхности шлифовального круга. При встречной подаче сразу после правки формируется шероховатость обработанной поверхности. При попутном шлифовании зерна начинают формировать поверхность материала вдоль дуги контакта, удаляемую следующими зернами, и только в конце дуги контакта формируют рельеф обработанной поверхности. По длине дуги контакта происходит скалывание зерен, воспринимающих наибольшую нагрузку, т. е. работающих с максимальной фактической глубиной резания и оставляющих глубокие царапины на поверхности обра-

батываемого материала. Этому способствует и более высокая, по сравнению со встречным шлифованием, ударная нагрузка. При этом по длине дуги контакта происходит сглаживание рельефа круга, сформированного правящим роликом. Такой же эффект, но в меньшей степени наблюдается и при шлифовании со встречной подачей. Но в этом случае сглаживание рельефа будет отражаться на шероховатости удаляемой поверхности. Поэтому при попутном шлифовании Ra меньше (рис. 1, б).

При обычном шлифовании шероховатость поверхности в начальный период также, как правило, больше. Хотя не исключены и другие варианты. Например, в результате очень "тонкой" правки можно получить "выглаженный" рельеф круга. Тогда в начале процесса шероховатость обработанной поверхности будет ниже [5].

Влияние режимов попутного шлифования и правки на параметры I_y и Ra приведено в табл. 1.

Изменение I_y в зависимости от v_s и t при постоянном значении S_n с одинаковым коэффициентом корреляции $K = 0,94 \div 0,99$ можно аппроксимировать линейной и степенной функциями. Степенные зависимости имеют следующий вид:

$$I_y = 0,46t^{0,97}; I_y = 0,024v_s^{0,75} \quad (1)$$

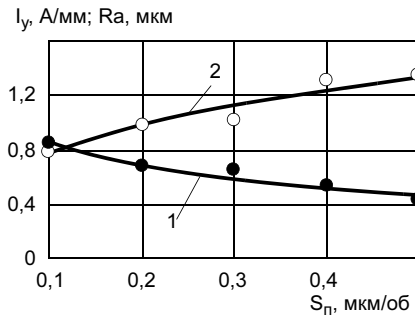


Рис. 2. Зависимость удельного тока I_y (1) и среднего арифметического отклонения профиля Ra (2) от скорости подачи правящего ролика S_n ($v_s = 50$ мм/мин, $t = 1$ мм, твердость круга ВМ2)

На шероховатость поверхности параметры v_s и t влияют в меньшей степени.

В работе [7] получена обобщенная степенная зависимость мощности шлифования сплава ВТ3-1 от основных параметров характеристики абразивного инструмента, скорости подачи стола и глубины шлифования. Результаты получены в более широком диапазоне режимов при шлифовании с периодической правкой круга. Показатели степени в модели работы [7] у параметров v_s и t меньше, чем в формуле (1), но соотношение между ними сохраняется.

С увеличением скорости шлифования от 20 до 30 м/с I_y вначале возрастает на 25 %, затем снижается почти до исходного значения. Шероховатость поверхности с увеличением скорости шлифо-

вания снижается на 20 %. Наибольшее влияние на параметр Ra оказывает подача правящего инструмента (рис. 2). С увеличением S_n от 0,1 до 0,5 мкм/об Ra возрастает почти на 80 % от 0,8 до 1,3 мкм, I_y при этом снижается на 50 %. Получены следующие зависимости I_y и Ra от S_n :

$$I_y = 0,883S_n^{-0,38}; K(S_n) = 0,92;$$

$$Ra = 0,783S_n^{0,33}; K(Ra) = 0,93.$$

Снижение силовой нагрузки вращения круга при шлифовании происходит в результате принудительного затачивания затупленных зерен. Чем на большую глубину в инструмент проникают алмазные зерна правящего ролика, тем большее количество зерен подвергается принудительной правке, т. е. затачивается, что облегчает резание металла. Правка — это процесс обновления рабочей поверхности абразивного инструмента с целью восстановления его режущих свойств и заданной геометрии рабочей поверхности. В результате правки с поверхности круга удаляется металл, налипший на вершины зерен, удаляются или обновляются затупленные зерна.

Возможные варианты снятия припуска 3 мм при $v_s = 50$ мм/мин кругом с твердостью М2 за счет выбора S_n для различной t приведены на рис. 3. При обработке

Таблица 1

Твердость круга	v , м/с	v_s , мм/мин	S_n , мкм/об	t , мм	I_y , А/мм	Ra , мкм
ВМ2	25	30	0,3	1,0	0,32	1,2
				0,7	0,35	1,2
				1,0	0,44	1,2
				1,3	0,60	1,3
				2,0	0,94	1,3
		50		1,0	0,64	1,1
				0,36	1,3	
				0,41	1,1	
				75	0,85	0,8
					0,68	1,0
М2	25	50	0,1	0,85	0,8	
			0,2	0,68	1,0	
			0,3	0,65	1,0	
			0,4	0,53	1,3	
			0,5	0,44	1,3	

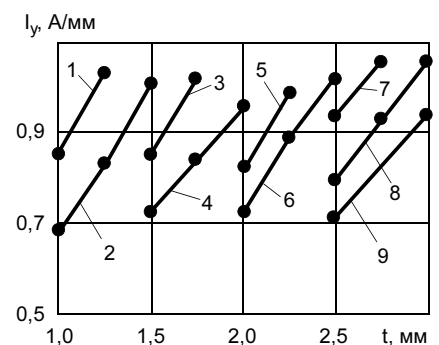


Рис. 3. Зависимость удельного тока I_y от глубины попутного шлифования при различной скорости подачи правящего ролика S_n : 1—9 — S_n равна 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8 и 0,9 мкм/об соответственно

с $S_n = 0,1$ мкм/об t не превышает 1,25 мм. Дальнейшее увеличение t приводит к остановке двигателя главного движения. С ростом S_n до 0,2 мкм/об I_y снижается на 25 %. Увеличение t в 1,5 раза на данном режиме правки вызывает пропорциональное изменение I_y , что при той же S_n на глубине 1,75 мм приводит к остановке двигателя. Поэтому S_n увеличили до 0,3 мкм/об. При глубине шлифования 1,5 мм увеличение S_n способствовало снижению I_y еще почти на 20 %. Но такого снижения I_y оказалось недостаточно для обработки с глубиной шлифования 2 мм. С увеличением S_n до 0,4 мкм/об при глубине 1,5 мм I_y снижается по сравнению с первоначальным значением в 1,3 раза, что обеспечило шлифование с глубиной 2 мм. Изменение t от 1,5 до 2,0 мм приводит к такому же увеличению I_y . С увеличением S_n до 0,5 мкм/об при $t = 2$ мм I_y снижается почти на 20 % и еще на 10 % при $S_n = 0,6$ мкм/об. Для $S_n = 0,5$ мкм/об шлифование возможно с глубиной 2,25 мм, для $S_n = 0,6$ мкм/об глубина возрастает еще на 0,25 мм. На этом возможности обработки с подачей $S_n = 0,6$ мкм/об также были исчерпаны. При шлифовании с глубиной 3 мм и той же скоростью подачи правящего ролика круг остановился. Подача ролика была увеличена до 0,7 мкм/об, но и в этом случае мощности двигателя оказалось недостаточно. Для круга с твердостью М2 минимальная S_n при глубине шлифования 3 мм должна быть не менее 0,8 мкм/об. При глубине 2,5 мм увеличение S_n от 0,6 до 0,9 мкм/об или в 1,5 раза приводит к снижению I_y на 40 %.

В результате выполненных исследований определено максимальное значение тока I_{max} , которое не должна превышать 38 А, что согласуется с данными, полученными при шлифовании поверхностей другой ширины. Существенное предельного значения силовой нагрузки глубинного шлифования установлено и по критерию образования прижогов [2, 6, 7].

Рекомендуемые S_n при шлифовании при скорости стола 50 мм/мин приведены в табл. 2. Там же указано основное время обработки T_o и радиальный износ круга в результате непрерывной правки h_n в зависимости от глубин шлифования t для заготовок различной длины l и ширины b .

С помощью табл. 2 можно подобрать оптимальные режимы шлифования, обеспечивающие максимальную производительность и минимальный расход абразивного инструмента для удаления заданного припуска. Например, снятие припуска 3 мм возможно за один или два прохода. При шлифовании в два прохода глубина шлифования может быть следующей: 1,5 и 1,5 мм; 2 и 1 мм; 2,5 и 0,5 мм. Основное время шлифования для приведенных значений глубины шлифования практически одинаково (различие в пределах 2 %), а расход инструмента изменяется в следующей пропорции: 1 : 1,28 : 1,84. При шлифовании за один проход расход круга в 2,22 больше, чем за два прохода по 1,5 мм, но T_o меньше в 1,8 раза.

Ранее было показано, что если режимы шлифования и правки обеспечивают стабильный рельеф рабочей поверхности абра-

зивного инструмента, то изменение силы шлифования по длине дуги контакта определяется мгновенной режущей способностью [9, 10]. С изменением глубины шлифования пропорционально изменяется мгновенная режущая способность и согласно формулам (1) почти пропорционально — ток. Показатель степени в формулах (1) всего на несколько сотых отличается от единицы. Поскольку сила шлифования или по крайней мере ее касательная составляющая изменяется пропорционально t , можно утверждать, что для рассмотренных условий сила шлифования определяется мгновенной режущей способностью. Поэтому в рассмотренных условиях существенного изменения рельефа рабочей поверхности круга не наблюдается.

Каждой глубине шлифования соответствует определенное значение мгновенной режущей способности q_m , формула для расчета которой в любой момент времени приведена в работе [9]. На этапе постоянной длины дуги контакта

$$q_m = v_s t b. \quad (2)$$

Сопоставим q_m с предельными значениями скорости подачи правящего ролика на рис. 3. Процесс шлифования начинается при $t = 1,0$ мм и $S_n = 0,1$ мкм/об. При $t = 1,5$ мм сила шлифования возрастает настолько, что мощности двигателя шпинделя оказывается недостаточно и круг останавливается. Поэтому $t = 1,25$ мм будем считать предельной глубиной шлифования для $S_n = 0,1$ мкм/об. Этой глубине соответствует $q_m = 35,6$ мм³/с, которую назовем предельной мгновенной режущей

Таблица 2

t , мм	L , мм	$l = 76$ мм, $b = 34$ мм				$l = 72$ мм, $b = 44$ мм			
		S_n , мкм/об	$l + L$, мм	T_o , с	h_n , мкм	S_n , мкм/об	$l + L$, мм	T_o , с	h_n , мкм
0,5	15,8	0,1	91,8	110,2	175,4	0,1	87,8	105,4	167,8
1,0	22,3	0,1	98,3	118,0	187,9	0,2	94,3	113,2	360,5
1,5	27,4	0,2	103,4	124,0	395,0	0,5	99,4	119,2	949,2
2,0	31,6	0,4	107,6	129,1	822,1	0,7	103,6	124,3	1385,2
2,5	35,3	0,6	111,3	133,5	1275,7	1,0	107,3	128,7	2049,7
3,0	38,6	0,9	114,6	137,5	1752,1	1,3	110,6	132,7	2747,6

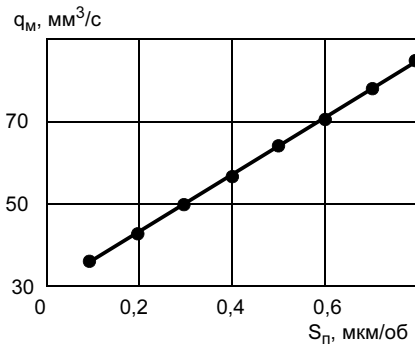


Рис. 4. Зависимость предельного значения мгновенной режущей способности q_M на этапе постоянной длины дуги контакта от скорости подачи ролика S_n

способностью при $S_n = 0,1$ мкм/об. Для того чтобы шлифовать с большей q_M , необходимо увеличить S_n до 0,2 мкм. Предельным значением мгновенной режущей способности для данной подачи ролика является $q_M = 42,7$ мм³/с, что соответствует глубине шлифования $t = 1,5$ мм. Таким образом были определены предельные значения q_M для каждой скорости подачи ролика (рис. 4). График аппроксимирован линейной зависимостью

$$q_M = 71S_n + 29 \text{ (мм}^3\text{/с);}$$

$$K(q_M) = 0,99. \quad (3)$$

Если бы в станке ЛШ220 можно было изменять S_n в процессе шлифования, это позволило бы существенно сократить расход инструмента при максимальной производительности обработки. На рис. 5 приведена диаграмма настройки подачи правящего ролика по длине шлифования плоской поверхности образца из титанового сплава ВТ8 размером 76×34 мм кругом характеристики 64С10М212К при $v = 25$ м/с, $v_s = 50$ мм/мин, $t = 3$ мм и направлении подачи стола — попутном. В этом случае расход инструмента на 65 % меньше, чем с постоянной подачей ролика. По сравнению с оптимальным режимом шлифования в два прохода при глубине 1,5 мм расход инструмента больше на 50 %, но время шлифования в 1,8 раза меньше.

Используя данные рис. 4 или формулу (3), можно рассчитать оп-

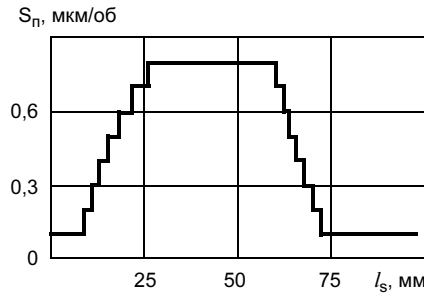


Рис. 5. Диаграмма настройки скорости подачи правящего ролика S_n по длине шлифования l_s

тимальный режим подачи правящего ролика при глубинном шлифовании поверхности другой ширины. Для этого так же как и в предыдущем варианте по формуле (3) определили предельные значения q_M для S_n в диапазоне от 0,1 до 1,0 мкм/об. Далее из формулы (1) по предельному значению q_M рассчитали предельные глубины шлифования для каждого S_n : $t = q_M/v_s b$.

В частности, такие расчеты выполнены для заготовки шириной 44 мм. Результаты приведены в табл. 2. Экспериментальная проверка данных табл. 2 в производственных условиях полностью подтвердила их соответствие.

Выбор оптимальных режимов шлифования и правки сделан из условия наибольшей производительности и наименьшего расхода дорогого высокопористого аб-

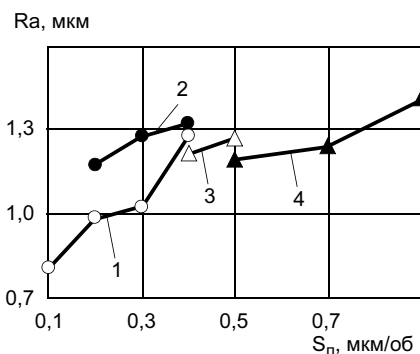


Рис. 6. Зависимость среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности Ra от подачи правящего ролика S_n при различной глубине шлифования (ВТ8, 64С10М212К, 50 мм/мин, попутная подача): 1—4 — t равна 1, 2, 3, 4 мм соответственно

разивного инструмента при условии получения заданного качества поверхности.

Прежде всего необходимо отметить, что все рассмотренные режимы обеспечивают бесприжоговое шлифование и необходимое отклонение от плоскости обработанной поверхности в пределах 0,01 мм. На рис. 6 приведены значения Ra для некоторых режимов.

Требуемая шероховатость получена только при глубине шлифования 1 мм в диапазоне подач правящего ролика до 0,3 мкм/об. Поэтому при больших глубинах шлифования для обеспечения требуемого значения Ra необходимо завершать удаление припуска при $t = 1$ мм или вводить чистовой проход без правки (рис. 7).

Для шлифования поверхностей шириной 34 мм кругом характеристики 64С10М212К рекомендованы два варианта режимов.

1. Режим шлифования, обеспечивающий минимальный расход абразивного инструмента.

Черновое шлифование, направление подачи стола попутное:

— первый проход $t = 1,5$ мм, $v_s = 50$ мм/мин, $S_n = 0,2$ мкм/об;

— второй проход $t = 1,5$ мм, $v_s = 50$ мм/мин, $S_n = 0,2$ мкм/об.

Чистовое шлифование, направление стола встречное:

— один проход без правки $t = 0,01$ мм, $v_s = 300$ мм/мин.

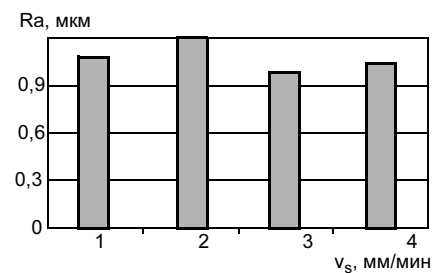


Рис. 7. Среднее арифметическое отклонение профиля Ra при попутном чистовом шлифовании без непрерывной правки на следующих режимах: 1 — $v_s = 300$ мм/мин, $t = 0,03$ мм; 2 — 100 мм/мин, 0,03 мм; 3 — 100 мм/мин, 0,01 мм; 4 — 300 мм/мин, 0,01 мм

2. Режим шлифования, обеспечивающий наибольшую производительность:

- первый проход $t = 2$ мм, $v_s = 50$ мм/мин, $S_n = 0,4$ мкм/об;
- второй проход $t = 1$ мм, $v_s = 50$ мм/мин, $S_n = 0,1$ мкм/об.

Для шлифования поверхностей шириной 44 мм кругом характеристики 64С10М212К рекомендован следующий режим:

- первый проход $t = 2$ мм, $v_s = 50$ мм/мин, $S_n = 0,7$ мкм/об;
- второй проход $t = 1$ мм, $v_s = 50$ мм/мин, $S_n = 0,2$ мкм/об.

С уменьшением твердости абразивного инструмента до ВМ2 l_y снижается. Например, для попутного шлифования на режимах $t = 1$ мм и $v_s = 50$ мм/мин снижение твердости круга позволяет уменьшить l_y на 22—31 %. Возникает тенденция увеличения влияния твердости круга с ростом подачи на правку в относительном выражении (рис. 8, а).

Снижение твердости круга позволило увеличить режимы обработки. С использованием абразивного инструмента с твердостью М2 двигатель останавливался при попутной скорости подачи стола 50 мм/мин при $S_n = 0,3$ мкм/об и $t = 2$ мм. При встречной подаче шлифование было невозможно и при глубине 1 мм. Снижение твердости круга до ВМ2 обеспечивает шлифование на этих режимах. При глубине шлифования 1,5 мм v_s можно увеличить до 70 мм/мин. Снижение твердости инструмента на две степени позволяет при прочих равных условиях умень-

шить подачу правящего ролика на 0,1—0,2 мкм/об, что сокращает расход абразивного инструмента на 30—50 %, однако Ra возрастает на 20—30 %.

ВЫВОДЫ

1. В результате лабораторных и производственных испытаний установлено, что мощность шлифования с попутной подачей меньше, чем со встречной. Шероховатость поверхности в первом случае ниже, чем во втором.

2. Удельный ток I_y двигателя главного движения увеличивается пропорционально t и v_s . С увеличением скорости шлифования от 20 до 30 м/с I_y вначале возрастает на 25 %, затем снижается почти до исходного значения, Ra снижается на 20 %. С увеличением глубины шлифования шероховатость обработанной поверхности в общем случае возрастает. С изменением скорости подачи стола шероховатость изменяется незначительно.

3. Наибольшее влияние на шероховатость поверхности оказывает подача правящего инструмента: с ее увеличением от 0,1 до 0,5 мкм/об Ra возрастает почти на 80 % с 0,8 до 1,3 мкм. Удельный ток при этом снижается на 50 %.

4. Разработанная методика определения оптимальной скорости подачи правящего ролика учитывает ограниченную мощность двигателя главного движения. Даны

рекомендации по выбору скорости подачи при шлифовании плоских поверхностей различной ширины.

5. Требуемый параметр шероховатости поверхности $Ra \leq 1,25$ мкм получен только при глубине шлифования 1 мм и подаче правящего ролика до 0,3 мкм/об. Поэтому при больших значениях глубины шлифования для получения $Ra \leq 1,25$ мкм необходимо завершать удаление припуска с глубиной 1 мм или вводить чистовой проход без правки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Глубинное шлифование деталей из труднообрабатываемых материалов / С. С. Силин, В. А. Хрульков, А. В. Лобанов, Н. С. Рыкунов. М.: Машиностроение, 1984. 64 с.
2. Носенко В. А., Егоров Н. И. Глубинное шлифование жаропрочных сплавов с непрерывной правкой круга алмазным роликом // Технология оборудования механосборочного производства. Сер. Вопросы оборонной техники. 1990. Вып. 1 (220). С. 21—27.
3. Старков В. К. Теоретические предпосылки профильного глубинного шлифования зубчатых колес // Вестник машиностроения. 2002. № 3. С. 49—55.
4. Рыкунов Н. С., Волков Д. И., Митрюхин В. В. Результаты исследований и внедрения в производство процессов глубинного шлифования // Справочник: Инженерный журнал. 2005. № 5. С. 19—27.
5. Особенности глубинного шлифования титановых сплавов / С. С. Силин, Б. Н. Леонов, В. А. Хрульков и др. // Вестник машиностроения. 1989. № 1. С. 43—45.
6. Носенко В. А., Егоров Н. И., Волков М. П. Выбор характеристики абразивного инструмента и СОЖ для глубинного шлифования // Вестник машиностроения. 1989. № 5. С. 17—21.
7. Профильное глубинное шлифование деталей из титановых сплавов / В. А. Поклад, А. Н. Шутов, В. К. Старков, С. А. Рябцев // Технология машиностроения. 2002. № 3. С. 14—22.
8. Лурье Г. Б. Шлифование металлов. М.: Машиностроение, 1969. 172 с.
9. Носенко В. А., Жуков В. К. Некоторые аспекты кинематики плоского глубинного шлифования // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2007. № 1. С. 78—94.
10. Носенко В. А., Жуков В. К., Васильев А. А. Сила и давление при глубинном шлифовании // Инструмент и технологии. 2006. № 24—25. С. 128—131.

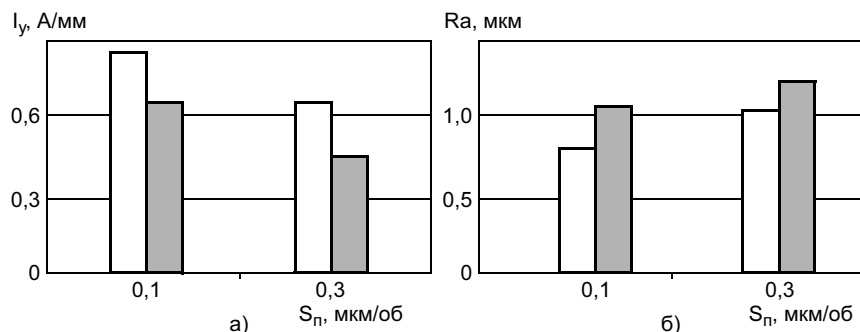


Рис. 8. Удельный ток I_y (а) и среднее арифметическое отклонение профиля Ra (б) обработанной поверхности при твердости круга М2 (светлые столбцы) и ВМ2 (темные) (попутное шлифование, $v_s = 50$ мм/мин, $t = 1$ мм)

В. И. ГУЗЕЕВ, д-р техн. наук, И. П. ДЕРЯБИН, канд. техн. наук, О. А. КОЖАРИНА, инж.
Южно-Уральский государственный университет (Челябинск)

Моделирование точности многопереходной обработки отверстий

Получение на станках с ЧПУ отверстий с высокой точностью расположения оси концевыми мерными инструментами (КМИ) является сложной технологической задачей. Применение наиболее простого способа повышения точности расположения оси — использование кондукторных втулок — на станках с ЧПУ крайне затруднительно или вообще невозможно. Поэтому погрешности расположения оси, возникшие на операциях сверления, сложно и трудоемко исправлять на последующих операциях рассверливания, зенкерования, развертывания и т. д. Рассмотрим основные причины возникновения погрешностей расположения оси, а именно увода, при многопереходной обработке отверстий.

Основной причиной возникновения увода оси отверстия при сверлении является неуравновешенность радиальных составляющих сил резания, действующих на разных режущих лезвиях инструмента. Это связано с переменностью площади сечения слоя, срезаемого каждым лезвием. Разность площадей в свою очередь определяется диссимметрией заточки режущих лезвий инструмента и осевыми колебаниями шпинделя станка¹. При последующей обработке просверленного отверстия к ним добавляется еще неравномерность припуска, связанная с погрешностью расположения оси отверстия в заготовке.

Рассмотрим возможные варианты сочетаний диссимметрии инструмента, положения оси отверстия в заготовке и фазы колебания шпинделя при обработке отверстия двухлезвийными инст-

рументами. Причиной диссимметрии режущих лезвий таких инструментов, как сверла, зенкеры, точные пластины, является в основном погрешность заточки главных углов в плане φ в пределах допуска на заточку $\varphi \pm \Delta\varphi$ ($\Delta\varphi$ — допуск на заточку главного угла в плане). Это приводит к различию главных углов в плане, например, для двухлезвийного инструмента φ_1 и φ_2 . Возможны предельные сочетания значений углов $\varphi_1 = \varphi + \Delta\varphi$, $\varphi_2 = \varphi - \Delta\varphi$ (рис. 1).

Неравномерность припуска $\Delta h = h_6 - h_m$ (h_6, h_m — соответственно большой и малый припуски, мм) вызвана эксцентриситетом осей инструмента и обрабатываемого отверстия Δ_0 , возникшим из-за погрешности установки заготовки относительно оси инструмента на позицию и погрешности расположения оси отверстия в заготовке (погрешность предшествующего перехода). В процессе обработки лезвия инструмента периодически будут располагаться со стороны наибольшего либо наименьшего припуска (рис. 2), при этом суммарная радиальная составляющая силы резания, действующая на лезвия, $\Sigma P_y = (P_{y1} - P_{y2})$ будет изменяться как по величине, так и направлению.

Для простоты представления зависимостей, определяющих составляющие силы резания, введем коэффициент K , обратно пропорционально зависящий от значений главных углов в плане φ . Если $\varphi_1 > \varphi_2$, то $K_2 > K_1$. Радиальную составляющую силы резания P_y упрощенно представим как $P_y = FK$ (F — площадь сечения срезаемого слоя) (см. рис. 2).

Введем понятие элементарного увода оси отверстия Δy , представляющего величину смещения оси за поворот инструмента на 180° .

Направление и значение Δy будут зависеть в основном от соотношения сил P_{y1} и P_{y2} .

Примем, что в текущем положении лезвие 1 расположено справа (см. рис. 2, а), а лезвие 2 — слева. При этом площадь $F_2 > F_1$

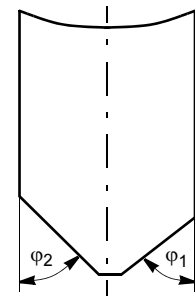


Рис. 1. Диссимметрия лезвий инструмента, связанная с погрешностью заточки угла φ

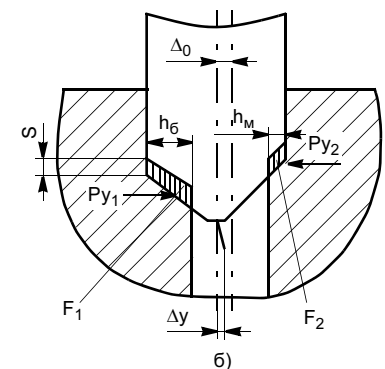
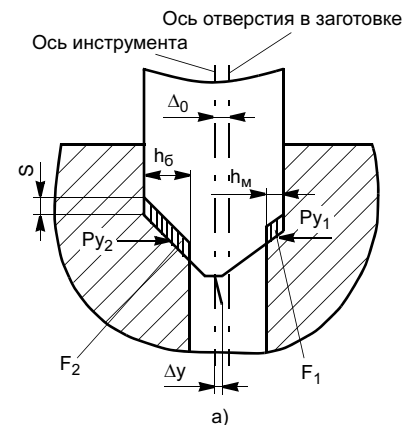


Рис. 2. Положение режущих лезвий: а — текущее; б — через поворот на 180°

¹ Гузеев В. И., Дерябин И. П. Прогнозирование параметров точности при обработке отверстий // Технология машиностроения. 2006. № 4. С. 9—14.

и коэффициент $K_2 > K_1$, следовательно и $P_{y2} > P_{y1}$, поэтому ось инструмента сместится вправо на величину элементарного увода Δy .

После поворота инструмента на 180° $F_1 > F_2$ (см. рис. 2, б), но $K_2 > K_1$, поэтому соотношение сил $P_{y1} = F_1 K_1$ и $P_{y2} = F_2 K_2$ может быть различным: от $P_{y2} < P_{y1}$ до $P_{y2} > P_{y1}$. Соотношение сил P_{y1} и P_{y2} будет зависеть от величины несоосности осей Δ_0 отверстия в заготовке и инструмента и погрешности заточки главных углов в плане $\Delta\phi$.

Рассмотрим четыре схемы сочетания начальных условий диссимметрии режущих лезвий и несоосности оси отверстия в заготовке и оси инструмента (см. таблицу).

Приближенно примем погрешность заточки "большая" при $\Delta\phi \geq \pm 3^\circ$, а несоосность "большая" при Δ_0 больше допуска на диаметр отверстия в заготовке.

Рассмотрим интенсивность увода оси отверстия при разных вариантах сочетаний диссимметрии инструмента и неравномерности припуска по каждой из схем в начальном положении и при повороте инструмента на угол 180° .

Схема I. Несоосность осей инструмента и отверстия заготовки Δ_0 большая, диссимметрия режущих лезвий большая.

Текущее положение (см. рис. 2, а)

В этом положении $K_2 > K_1$ и $F_2 > F_1$, следовательно, $P_{y2} > P_{y1}$.

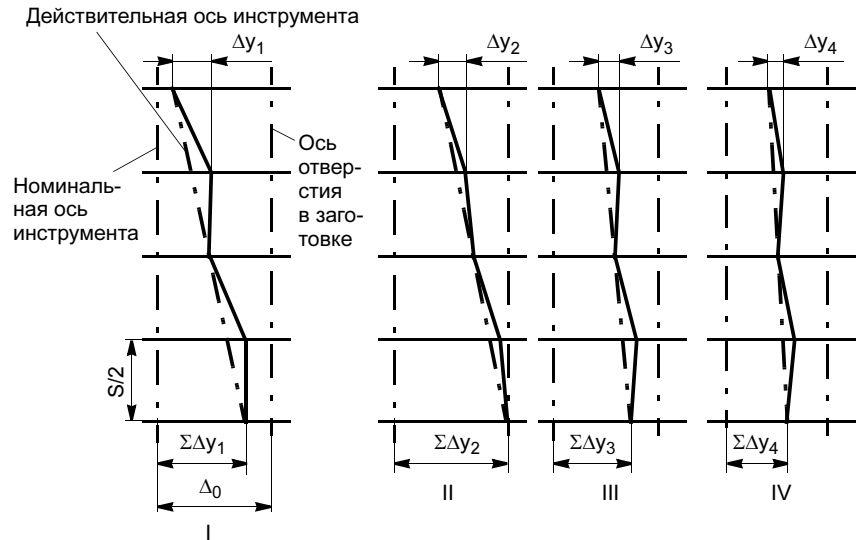


Рис. 3. Суммарный увод оси $\Sigma\Delta y$ при различных схемах диссимметрии (см. таблицу)

Ось инструмента отклонится вправо на величину элементарного увода Δy_1 .

При повороте инструмента на 180° (см. рис. 2, б)

Теперь $F_1 > F_2$. Площадь срезаемого слоя лезвием 2 будет меньше площади, срезаемой лезвием 1 вследствие значительной несоосности осей инструмента и предварительно обработанного отверстия. Однако в силу того, что $K_2 > K_1$, разность между P_{y2} и P_{y1} будет мала либо равна нулю. Увод оси инструмента не увеличится (рис. 3, I).

Смещение оси инструмента в последующих положениях будет происходить аналогично в со-

ответствии с положением режущих кромок. Колебания будут иметь затухающий характер в связи с выравниванием площадей срезаемого слоя. Ось инструмента будет удаляться от своего номинального положения, увод будет возрастать при увеличении глубины обрабатываемого отверстия.

Схема II. Несоосность осей инструмента и отверстия заготовки Δ_0 большая, диссимметрия режущих лезвий $\Delta\phi$ малая.

Текущее положение (см. рис. 2, а).

Площадь срезаемого слоя лезвием 2 будет больше площади слоя срезаемого лезвием 1 — $F_2 > F_1$ вследствие значительной несоосности осей инструмента и предварительно обработанного отверстия (аналогично схеме I). Но поскольку разница между K_2 и K_1 меньше, чем в схеме I, то и разница между P_{y2} и P_{y1} меньше, поэтому элементарный увод $\Delta y_2 < \Delta y_1$. Ось инструмента под действием преобладающей силы P_{y2} сместится вправо на величину Δy_2 .

При повороте инструмента на 180° (рис. 2, б).

Теперь $F_1 > F_2$, но так как разность $K_2 - K_1$ мала, то $P_{y1} = F_1 K_1 > P_{y2} = F_2 K_2$, следовательно, ось отклонится снова вправо, причем менее интенсивно, чем в начальном положении. Ось инструмента при каждом полуобороте смеща-

Номер схемы	Увод оси отверстия, мм	Начальные условия		Возможные соотношения радиальных сил резания*
		Погрешность заточки режущих лезвий (диссимметрия) $\Delta\phi$, °	Несоосность оси отверстия в заготовке и оси инструмента Δ_0 , мм	
I	$\Sigma\Delta y_1$	Большая	Большая	$P_{y2} > P_{y1}$; $P_{y1} = P_{y2}$
II	$\Sigma\Delta y_2$	Малая	"	$P_{y2} > P_{y1}$; $P_{y1} > P_{y2}$
III	$\Sigma\Delta y_3$	Большая	Малая	$P_{y2} > P_{y1}$; $P_{y1} < P_{y2}$
IV	$\Sigma\Delta y_4$	Малая	"	$P_{y2} > P_{y1}$; $P_{y1} > P_{y2}$

* Первое соотношение — текущее положение инструмента (см. рис. 2, а), второе — положение инструмента через 180° (см. рис. 2, б)

ется от своего номинального положения вправо. Суммарный увод оси по схеме II более интенсивен, чем в схеме I, т. е. $\Sigma\Delta y_2 > \Sigma\Delta y_1$ (рис. 3, II).

Схема III. Несоосность осей инструмента и отверстия заготовки Δ_0 малая, диссимметрия режущих лезвий $\Delta\phi$ большая.

Текущее положение (см. рис. 2, а)

$K_2 > K_1$ по условию, $P_{y2} > P_{y1}$, так как $K_2 > K_1$ и $F_2 > F_1$. Смещение оси пойдет вправо. Поскольку разность между F_2 и F_1 меньше, чем в первом случае, то элементарный увод $\Delta y_3 < \Delta y_1$.

При повороте инструмента на 180° (см. рис. 2, б)

$K_2 > K_1$ по условию. Теперь $F_1 > F_2$, однако разность между ними меньше, чем в схемах I и II, в силу того, что несоосность осей инструмента и отверстия заготовки малая. Поэтому главную роль будут играть K_2 и K_1 , т. е. возможно смещение оси влево. Ось инструмента возвратно-поступательно перемещается в сторону оси отверстия заготовки, отклоняясь от номинального положения. Суммарный увод оси в этой схеме носит менее интенсивный характер, чем в схемах I и II, $\Sigma\Delta y_3 < \Sigma\Delta y_1 < \Sigma\Delta y_2$ (рис. 3, III).

Схема IV. Несоосность осей инструмента и отверстия заготовки Δ_0 малая, диссимметрия режущих лезвий $\Delta\phi$ малая.

Текущее положение (см. рис. 2, а)

$K_2 > K_1$ по условию, $P_{y2} > P_{y1}$, так как $K_2 > K_1$ и $F_2 > F_1$. Увод оси инструмента происходит в сторону оси отверстия заготовки. Элементарный увод Δy_4 будет наименьший, поскольку разность K_2 и K_1 минимальна и разность F_2 и F_1 тоже минимальна.

При повороте инструмента на 180° (см. рис. 2, б)

Теперь $F_1 > F_2$, но $K_2 > K_1$, поэтому разность между F_1K_1 и F_2K_2 мала либо равна нулю. Возможно выравнивание сил, действующих на лезвия, $P_{y2} = P_{y1}$. Увод оси может не увеличиться (рис. 3, IV). Увод оси инструмента $\Sigma\Delta y_4$ в этой схеме происходит аналогично

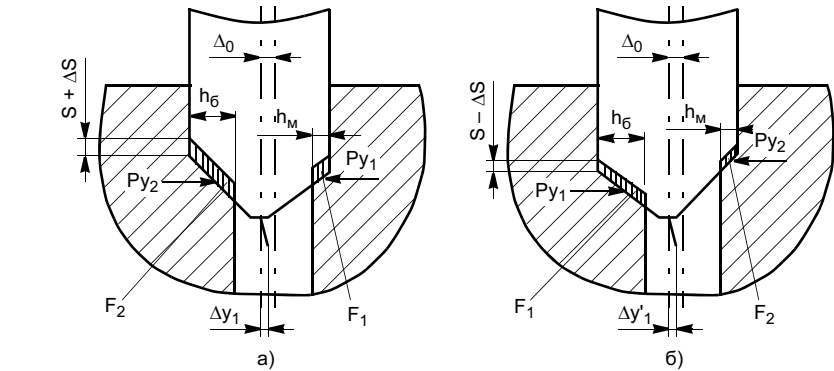


Рис. 4. Схема 1 — положение лезвия 2 со стороны большего припуска в момент фазы максимального положительного колебания: а, б — см. рис. 2

схеме I, но менее интенсивно, при этом $\Sigma\Delta y_4 < \Sigma\Delta y_3$.

Таким образом, если погрешность расположения оси после сверления отверстия большая, то на следующем переходе необходим инструмент с диссимметричной заточкой, так как $\Sigma\Delta y_2 > \Sigma\Delta y_1$. Если после сверления отверстия увод оси мал, то диссимметрия инструмента на следующем переходе должна быть малой, так как $\Sigma\Delta y_3 > \Sigma\Delta y_4$.

Основной причиной возникновения увода оси при обработке отверстий КМИ являются осевые колебания шпинделя, приводящие к колебаниям подачи с амплитудой ΔS^1 . Рассмотрим механизм возникновения увода оси отверстия с учетом осевых колебаний, характеризующихся амплитудой ΔS и периодом, равным одному обороту шпинделя. Положительной фазой колебания будем называть момент максимальной амплитуды, направленной в сторону обрабатываемой детали, при котором подача будет $S + \Delta S$, увеличение подачи приведет к увеличению площади срезаемого слоя.

При несоосности осей инструмента и отверстия в заготовке Δ_0 возможны варианты, когда положительная фаза возникает при положении лезвия с большим коэффициентом K_2 со стороны большего припуска либо меньшего припуска. Рассмотрим схемы обработки с учетом осевых колебаний шпинделя и положения лезвий относительно максимального припуска под обработку.

Схема 1 (рис. 4) — лезвие 2 со стороны большего припуска в момент максимального положительной фазы колебания шпинделя.

Поскольку лезвие 2 в момент положительной фазы ($S + \Delta S$) находится со стороны максимального пропуска, то площадь срезаемого сечения F_2 при этом увеличится на большую величину, чем F_1 . Это объясняется тем, что форму срезаемого сечения можно упрощенно принять за параллелограмм, площадь которого равна Sh (h — припуск). Поэтому при увеличении подачи S разность между P_{y2} и P_{y1} увеличится, а следовательно, увеличится и увод оси инструмента. При этом разность радиальных сил на лезвиях

$$\begin{aligned} \Delta P_{y1} &= K_2 h_6 (S_0 + \Delta S) - \\ &- K_1 h_M (S_0 + \Delta S) = \\ &= (S_0 + \Delta S)(K_2 h_6 - K_1 h_M). \end{aligned} \quad (1)$$

Поскольку $K_2 > K_1$, то $K_2 h_6 \gg K_1 h_M$ и элементарный увод Δy_1 будет значительным.

При повороте инструмента на 180° со стороны максимального припуска окажется лезвие 1, подача при этом $S = S_0 - \Delta S$ и разность радиальных сил

$$\begin{aligned} \Delta P_{y1}' &= K_1 h_6 (S_0 - \Delta S) - \\ &- K_2 h_M (S_0 - \Delta S) = \\ &= (S_0 - \Delta S)(K_1 h_6 - K_2 h_M). \end{aligned} \quad (2)$$

В этом случае разность между $K_1 h_6$ и $K_2 h_M$ будет мала, следовательно, и элементарный увод $\Delta y_1'$ будет мал. Нарастание увода приведено на рис. 5, а.

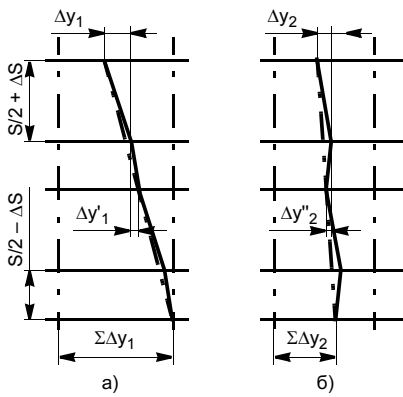


Рис. 5. Суммарный увод оси с учетом осевых колебаний шпинделя при схемах 1 (а) и 2 (б)

Схема 2 — лезвие 1 со стороны большего припуска в момент фазы максимального положительного колебания шпинделя (рис. 6).

В начальном положении (см. рис. 6, а) разность радиальных сил

$$\Delta P_{y2} = K_1 h_6 (S_0 + \Delta S) - K_2 h_m (S_0 + \Delta S) = (S_0 + \Delta S)(K_1 h_6 - K_2 h_m). \quad (3)$$

Поскольку разность между $K_1 h_6$ и $K_2 h_m$ мала, то элементарный

увод Δy_2 будет значительно меньше, чем Δy_1 в схеме 1. При повороте инструмента на 180° разность радиальных сил

$$\Delta P_{y2}' = K_2 h_6 (S_0 - \Delta S) - K_1 h_m (S_0 - \Delta S) = (S_0 - \Delta S)(K_2 h_6 - K_1 h_m). \quad (4)$$

Поскольку разность между $K_2 h_6$ и $K_1 h_m$ большая, а $S_0 - \Delta S$ мало, то $\Delta P_{y2} \approx \Delta P_{y2}'$, следовательно, и элементарный увод $\Delta y_2 \approx \Delta y_2'$. При этом они будут иметь одно направление — вправо (см. рис. 5, б). По этой схеме суммарный увод будет меньше, чем по схеме 1.

Таким образом, увод оси отверстия после сверления исправляется больше, когда фаза максимального положительного колебания шпинделя, а следовательно, и максимальная подача наступают при положении лезвия 1 (с большим углом ϕ) со стороны наибольшего припуска. Для этого необходимо установить инструмент в шпинделе станка так, чтобы лезвие 1 располагалось со сторо-

ны наибольшего припуска в момент фазы максимального положительного колебания шпинделя.

На станках с вращением инструмента это можно выполнить следующим образом. Сначала определяется фаза максимального осевого колебания шпинделя с помощью приспособления, приведенного на рис. 7. При этом на гильзе и шпинделе ставится метка. На установленной на станке детали определяется положение наибольшего припуска и относительно него угол ψ разворота с меткой на гильзе (рис. 8). Инструмент (сверло, расточная пластина или двухлезвийный зенкер) в шпинделе устанавливается так, чтобы лезвие 1 было повернуто на угол ψ относительно метки на шпинделе станка.

На станках с ЧПУ, имеющих датчики угла поворота шпинделя, данная процедура может быть задана программой. При этом необходимо определенным образом сориентировать инструмент в магазине.

На станках с вращением детали (токарная группа) при установке детали необходимо совместить метку на шпинделе с положением наибольшего припуска; лезвие 1 инструмента совместить с меткой на гильзе шпинделя или другой невращающейся частью станка.

На производстве нередко встречаются случаи, когда опытные рабочие при рассверливании или зенкерования отверстий поворотом инструмента, закрепленного, например, в револьверной головке, вслепую ищут его положение, при котором увод оси, полученный при сверлении, будет максимально снижен. Таким образом, они пытаются найти положение инструмента, когда лезвие 1 совпадает с фазой максимального положительного осевого колебания шпинделя.

Предлагаемая методика позволит повысить точность положения оси отверстия на начальных этапах обработки и исключить дополнительные переходы, например координатное или алмазное растачивание. Это повысит эффективность применения дорогостоящего оборудования — станков с ЧПУ.

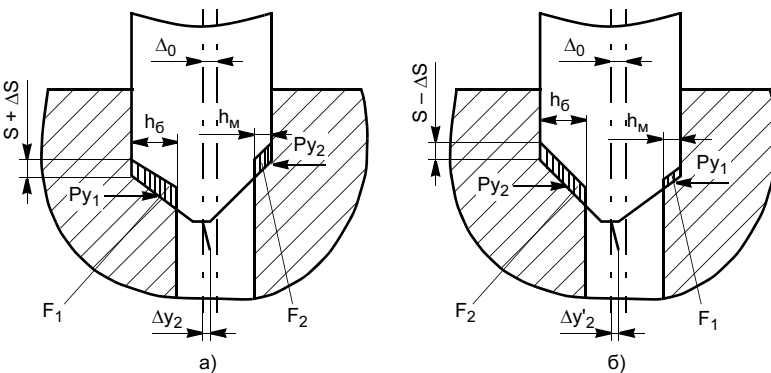


Рис. 6. Схема 2 — положение лезвия 1 со стороны большего припуска в момент фазы максимального положительного колебания: а, б — см. рис. 2

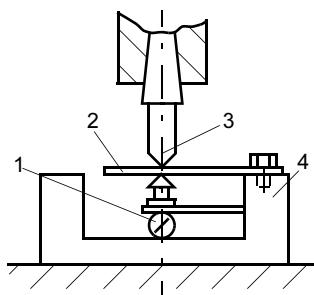


Рис. 7. Схема измерения осевых биений шпинделя: 1 — индикатор; 2 — упругая пластина; 3 — центр; 4 — стойка

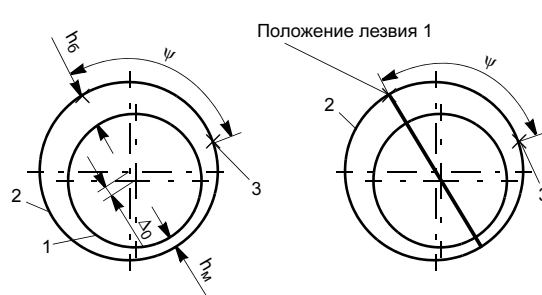


Рис. 8. Схема установки инструмента: 1 — отверстие в заготовке; 2 — инструмент; 3 — метки на гильзе и шпинделе

Ю. В. КИРИЛИН, д-р техн. наук

Ульяновский государственный технический университет

Сравнение стохастического и детерминированного способов определения динамической характеристики тяжелых фрезерных станков

Известно, что при анализе металлорежущего станка с учетом процесса его функционирования станок необходимо рассматривать как замкнутую динамическую систему [1]. При этом в структурной схеме станка можно выделить следующие основные звенья: несущую систему (НС); привод подачи (ПП); привод главного движения (ПГД); процесс резания (ПР).

Несущая система, приводы подачи и главного движения являются параллельно соединенными звеньями и образуют эквивалентную упругую систему (ЭУС). Входным воздействием для ЭУС является сила резания, а выходным — относительное перемещение режущего инструмента и заготовки.

Динамическая характеристика резания представляет собой зависимость изменения силы резания от вызвавшего это изменение приращения глубины резания. Если учесть влияние следов обработки от предыдущего прохода, то динамическую характеристику резания можно записать в виде

$$W_p(p) = \frac{K_p(e^{-p\tau} - 1)}{T_p p + 1}, \quad (1)$$

где K_p — коэффициент резания, равный Kb (K — удельная сила резания, b — ширина стружки); τ — постоянная времени запаздывания, равная $60/nz$ (n — частота вращения, z — число зубьев); T_p — постоянная времени стружкообразования, равная l_p/v (v — скорость резания, l_p — некоторый путь движения резца фрезы, определяющий формирование силы резания); p — параметр преобразования Лапласа.

Известно, что в процессе резания на тяжелых фрезерных станках происходят интенсивные колебания с частотами, характерными для НС, ПП и ПГД. Суммирование характеристик НС и ПП осуществляется путем сложения их одноименных составляющих и рассмотрено в работе [2]. Добавление к ним характеристик ПГД имеет особенности, связанные с тем, что ПП и НС в процессе резания получают линейные перемещения, а ПГД угловые.

На рис. 1 изображена схема сил на передней поверхности i -го зуба фрезы и соответствующая сила резания P_i (α — угол наклона полной силы резания P_i к обрабатываемой поверхности; β — угол между горизонтальной проекцией приращения силы реза-

ния P_{ixy} и отрезком, направленным к центру фрезы; χ — главный угол фрезы в плане; φ_i — угол, определяющий текущее положение i -го зуба относительно осей X, Y, Z ; u_i — приращение толщины среза на i -м зубе).

Составляющая силы резания P_{iA} перпендикулярна обрабатываемой поверхности. Составляющие силы резания в осях x_i, y_i, z_i , связанные с i -м зубом фрезы,

$$P_{ixi} = P_i \cos \alpha \cos \beta; \quad P_{iy_1} = P_{in} = -P_i \cos \alpha \sin \beta; \\ P_{iz_1} = P_i \sin \alpha.$$

В осях X, Y, Z , которые будем называть единичными, составляющие силы резания

$$P_{iX} = P_i \cos \alpha \sin(\beta + \varphi_i); \quad P_{iY} = P_i \cos \alpha \cos(\beta + \varphi_i); \\ P_{iZ} = P_i \sin \alpha.$$

Силы резания воздействуют на НС, ПП и вызывают закручивание ПГД. Определим перемещения U_j , возникающие от действия сил $P_i = P_i^0 n_{ip}$, (P_i^0 — мо-

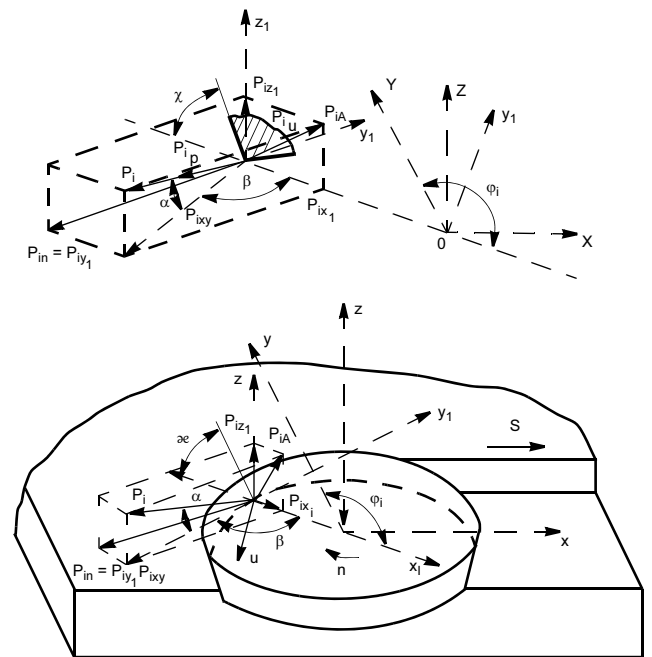


Рис. 1. Схема сил, действующих на переднюю грань i -го зуба при фрезеровании

дуль силы P_i , $n_{ip} = [\cos \alpha \sin(\beta + \varphi_i); \cos \alpha \cos(\beta + \varphi_i); \sin \alpha]^T$ — единичный орт, имеющий направление силы резания P_i , T — означает транспонирование).

Перемещение U_j от действия всех сил P_i

$$n_{ju}^T \sum_{i=1}^S n_{ip} P_i^0 = U_j, \quad (2)$$

где n_{ju} — единичный орт, имеющий направление U_j и равный $(\sin x \sin \varphi_j; \sin x \cos \varphi_j; \cos x)^T$; W — передаточная функция НС и ПП.

Учитывая, что $P_i^0 = W_p U_i = W_p n_{iu}^T U$ (U — вектор относительного перемещения между центром фрезы и заготовкой, равный $(U_x, U_y, U_z)^T$), согласно выражению (2), получим

$$(W_p WR - I)U = 0, \quad (3)$$

где R — матрица коэффициентов направления, равная $\sum_{i=1}^S n_{ip} n_{iu}^T = \sum_{i=1}^S R_i$ [2, 3]; I — единичная матрица.

Для учета влияния угловых колебаний на устойчивость станка в целом необходимо определить влияние этих колебаний на толщину срезаемой стружки, а затем соответствующее приращение крутящего момента на фрезе. Если считать, что толщина среза определяется зависимостью $U_i^0 = U_0 \sin x \sin \varphi_i$ (U^0 — подача на зуб), то приращение U_{iy}^0 за счет поворота фрезы на угол γ будет U_{iy}^0 . Угол закручивания ПГД

$$\gamma = P_\tau R_f W_\gamma, \quad (4)$$

где P_τ — окружная сила, равная $\sum_{i=1}^S P_i^0 \cos \alpha \sin \beta$; R_f — радиус фрезы, W_γ — передаточная функция главного привода (динамическая крутильная податливость).

Влиянием изменения ортов n_{iu} и n_{ip} за счет поворота на угол γ пренебрегаем.

Рассмотрим соотношение (3) для конечных отклонений $U_0 + U$, где U_0^T — вектор подачи на зуб, равный (U_{0x}, U_{0y}, U_{0z}) (обычно имеет одну составляющую $U_{0x} = U_0$; $U_{0y} = U_{0z} = 0$).

Разложим матрицу R по малому углу закручивания ПГД, т. е. γ . Тогда, пренебрегая малыми высшего порядка, вместо выражения (3) получим соотношение

$$W_p^0 W \left(RU + \frac{dR_i}{d\varphi_i} U_{0\gamma} \right) = U, \quad (5)$$

где $W_p^0 = \frac{W_p}{1 - W_p W_\gamma}$.

Соотношения, входящие в матрицу $dR_i/d\varphi_i$, образуют матрицу угла закручивания главного привода γ . Величину γ определяем из соотношения (4).

Выражение для окружной силы преобразуется к виду

$$P_\tau = W_p^0 \cos \alpha \sin \beta \left(\sum_{i=1}^S n_{iu}^T \right) U. \quad (6)$$

Подставив выражение (6) в формулу (4), а затем исключив γ из уравнения (5) и поступая так же, как и при выводе соотношения (3), получим квадратное уравнение для критической ширины срезаемой стружки:

$$W_p^0 t_r(WR) + (W_p^0)^2 t_r \times \\ \times \left(W \frac{dR_i}{d\varphi_i} \right) U_0 \left(\sum_{i=1}^S n_{iu}^T \right) W_\gamma R_f \cos \alpha \sin \beta = 1. \quad (7)$$

Здесь первое слагаемое характеризует в основном НС и ПП, а второе — ПГД. При этом, построив динамические характеристики выражений для первого и второго слагаемых, можно судить о влиянии любого из элементов, образующих ЭУС.

Расчеты проводили для двух моделей станков, характерных представителей фрезерных станков производства УЗТС — для тяжелого вертикально-фрезерного станка 654 и уникального специального станка УФО 747 (изготовленного на базе станка 6640).

Исходные данные для расчета станка 654: диаметр фрезы $D = 320$ мм; ширина фрезерования $B = 250$ мм; число оборотов шпинделя $n = 80$ об/мин; глубина фрезерования $t = 6$ мм; число зубьев фрезы $S = 18$; подача на зуб $S_z = 0,4$ мм/зуб; $\chi = 60^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\alpha = 11^\circ$; обрабатываемый материал — сталь 45.

Исходные данные для расчета станка УФО 747: диаметр фрезы $D = 630$ мм; ширина фрезерования $B = 380$ мм; число оборотов шпинделя $n = 25$ об/мин; глубина фрезерования $t = 10$ мм; число зубьев фрезы $S = 30$; подача $S_z = 0,25$ мм/зуб; $\chi = 60^\circ$; $\beta = 70^\circ$; $\alpha = 11^\circ$; обрабатываемый материал — сталь 45. Процесс резания в данном разделе не исследовали, поэтому значение параметра I_p взято из работы [4].

Результаты расчета приведены на рис. 2, 3. Из рисунков видно, что для обоих станков динамическая податливость первого слагаемого в соответствии с выражением (7) более чем в 20 раз больше податливости второго слагаемого. Учитывая при этом, что характеристика разомкнутой системы $W_{раз}$ определяется выражением (7) в результате суммирования первого и второго слагаемых, делаем вывод, что для рассмотренных случаев динамическая характеристика станка по связи с резанием определяется в основном выражением $W_p^0 t_r(WR)$ и мало зависит от второго слагаемого.

Для исследования элементов несущих систем и привода подачи стола, например для разработки алгоритмов их диагностирования, необходимо сравнить динамическую характеристику станка, полученную непосредственно при резании, с характеристикой, полученной другим методом, например, при возбуждении станка вибратором. С этой целью проведен комплекс работ по экспериментальному определению динамической характеристики при резании и расчетному построению такой же характеристики с использованием экспериментальных данных (по амплитудно-фазовым частотным характеристикам НС, полученным с помощью вибратора, и расчетным характеристикам ПП). Передаточная функция привода подачи может быть выражена следующей зависимостью [2]:

$$W_{ПП} = \frac{K_{ПП}(T_{1П}^0 P + 1)}{T_{3П}P^3 + T_{2П}P^2 + T_{1П}P + 1},$$

где $K_{ПП} = 1/C$ (C — жесткость подвижного стыка); $T_{1П}^0$ — постоянная времени всплывания, равная b_1 ; $T_{3П} = b_1 m/c$ (m — масса узла, перемещающаяся по направляющим); $T_{2П} = (b_1 b_r + b_1 b_g + m)/C$ (b_r — коэффициент рассеяния энергии в материале пружины, b_g — коэффициент вязкого сопротивления); $T_{1П} = (b_r + b_1 C - b)/C$ (b — угловой коэффициент наклона статической скоростной характеристики трения).

В качестве объекта исследований выбран тяжелый вертикально-фрезерный станок с устройством ЧПУ 6560 МФЗ, отличающийся тем, что динамическая податливость в направлении подачи стола (ось X) значительно превышает остальные составляющие. В связи с этим сравнение производили только для одной составляющей W_{xx} матрицы динамической характеристики станка.

Эксперимент проводили при спокойном резании с запасом устойчивости порядка 30 %. При построении расчетной характеристики параллельным запаздывающим воздействием, учитывающим влияние следов обработки, пренебрегли.

Результаты исследований приведены на рис. 4. Из рисунка видно, что совпадение по собственным частотам получилось удовлетворительным, отличие составило 7—10 %. Совпадение по динамической податливости также удовлетворительное, отличие составило 5—15 %. Фазовые углы экспериментальной динамической характери-

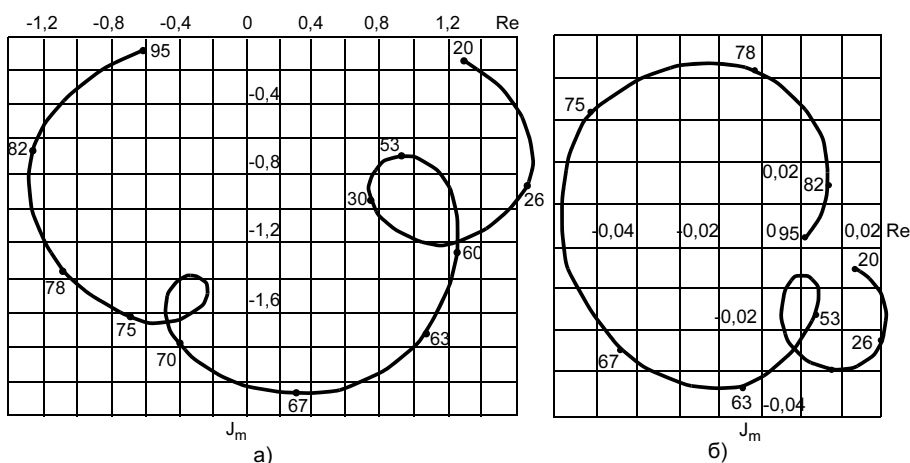


Рис. 2. АФЧХ первого (а) и второго (б) слагаемых по выражению (7) для станка 654

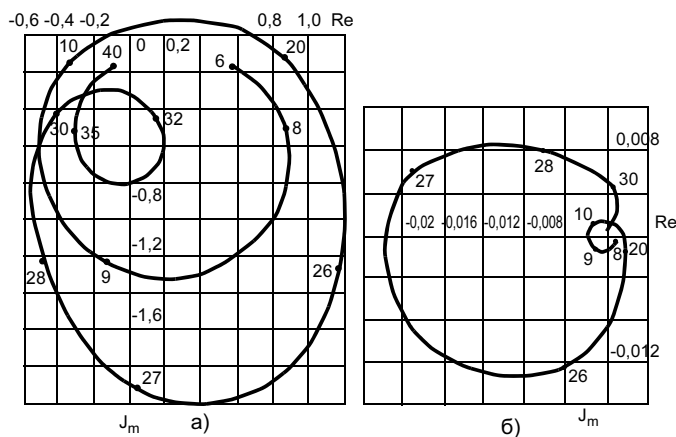


Рис. 3. АФЧХ первого (а) и второго (б) слагаемых по выражению (7) для станка УФ 0747

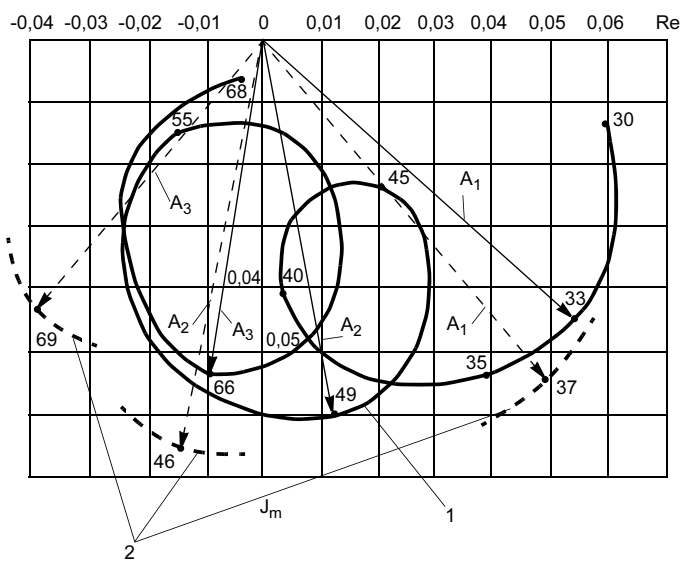


Рис. 4. АФЧХ станка 6560 МФЗ

стики станка для соответствующих резонансных частот отличаются от расчетной на 10—30 % в сторону увеличения. Такое различие фазовых углов можно объяснить погрешностью работы оператора при ручном введении экспериментальных данных во время работы с преобразователем Ф001.

Кроме того, в процессе исследований установлено, что привод подачи стола существенно влияет на форму и значение податливости АФЧХ исследуемых станков. Например, отказ от учета ПП при расчете АФЧХ станков УФО747 и 6560МФЗ привел бы к потере одного из определяющих витков динамической характеристики на частотах 9 и 66 Гц (см. рис. 4).

В ходе расчетного анализа установлено, что для продольно-фрезерных станков привод подачи стола определяет первый резонансный пик, для вертикально-фрезерных станков — третий.

Таким образом, метод стохастического определения динамической характеристики непосредственно в процессе резания позволяет с необходимой точностью определить динамическую характеристику станка по связи с резанием, однако с помощью этого метода затруднительно выявить влияние уз-

лов, образующих НС, на формирование и величину конкретных витков динамической характеристики, что бывает необходимо при анализе новых конструктивных решений отдельных узлов и базовых деталей станка. В то же время метод определения динамических характеристик с помощью вибратора и расчетные методы сравнительно просто позволяют объяснить происхождение каждого резонансного пика, поэтому метод стохастического определения динамических характеристик при резании необходимо использовать в сочетании с методами детерминированного анализа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудинов В. А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 360 с.
2. Санкин Ю. Н. Динамические характеристики вязко-упругих систем с распределенными параметрами. Саратов: Изд-во Саратовского университета, 1977. 308 с.
3. Opitz M., Bernardi F. Investigation and calculation of the chatter behaviour of lathes and milling machines // GJRP Ann. № 2.
4. Эльясберг М. Е. К теории и расчету устойчивости процесса резания металла на станках // Станки и инструмент. 1972. № 1. С. 3—7.

В. А. СМОРНОВ, аспирант, А. Г. КИРЬЯНОВ, инж., Л. Л. ЛУКИН, канд. техн. наук
Ижевский государственный технический университет

Влияние эксцентриситета шлифовального круга прямого профиля на показатели процесса плоского периферийного шлифования

Для любого шлифовального круга характерен эксцентриситет (рис. 1). В работе [1] отмечается, что эксцентриситет шлифовального круга формируется в результате правки, а также возникает в процессе шлифования вследствие колебаний шпиндельного узла, например, из-за дисбаланса шлифовального круга. Для шлифовальных кругов с однослойным напылением алмазов эксцентриситет определяется точностью изготовления корпуса, на который наносится алмазоносный слой.

Общеизвестно, что показатели процесса шлифования, такие как силы резания, мгновенная и средняя температура в зоне резания, непосредственно зависят от величины срезаемого каждым режущим зерном слоя материала a_z . Согласно работе [2], колебания, сопутствующие резанию, всегда сопровождаются изменением толщины среза. В литературных источниках [1 и др.] в основном рассматривается влияние эксцентриситета шлифовального круга на показатели волнистости шлифованной поверхности, однако не приводятся данные о влиянии эксцентриситета на величину срезаемого каждым зер-

ном слоя материала a_z . Для определения степени влияния эксцентриситета круга на величину срезаемого каждым зерном слоя материала провели серию компьютерных экспериментов с построением траекторий движения точек периферии шлифовального круга прямого профиля с заданным экс-

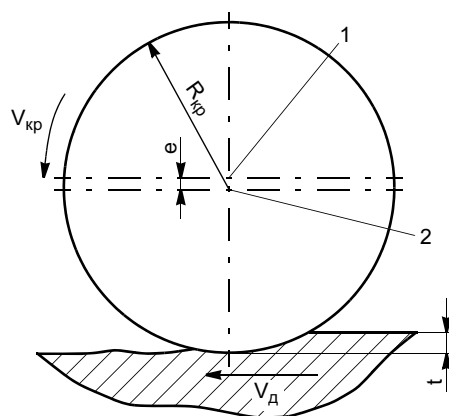


Рис. 1. Работа шлифовального круга с эксцентриситетом e : 1 — ось вращения круга; 2 — геометрическая ось круга

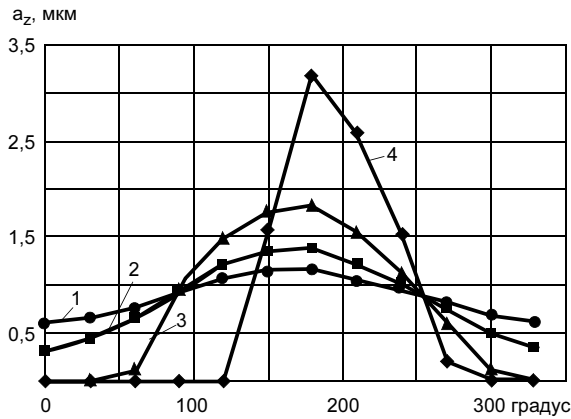


Рис. 2. Зависимость толщины срезаемого сектором слоя материала от угла поворота шлифовального круга при e , равном 0,0005 (1), 0,001 (2), 0,002 (3) и 0,005 (4) мм

центриситетом. Для этого режущую поверхность шлифовального круга условно разбили на 12 одинаковых секторов. Для каждого сектора определяли величину срезаемого им слоя материала. Пример зависимости величины слоя материала, срезаемого разными секторами круга при различных величинах эксцентриситета круга, приведен на рис. 2 (режим обработки: $v_{кр} = 35$ м/с; $v_d = 0,05$ м/с; $t = 0,01$ мм).

В процессе экспериментального исследования и компьютерного моделирования работы шлифовального круга с эксцентриситетом установлено, что даже незначительный эксцентриситет приводит к тому, что режущие зерна периферии шлифовального круга нагружаются неравномерно. Наиболее нагруженная часть круга срезает слой толщиной, в несколько раз превосходящей среднюю величину срезаемого слоя. Это приводит к значительному увеличению мгновенной силы резания, мгновенной и средней температуры в зоне резания, и может привести к увеличению шероховатости и волнистости шлифованной поверхности и даже появлению на поверхности заготовки циклических прижогов, снижающих эксплуатационные показатели готовой детали. Натурные эксперименты подтверждают

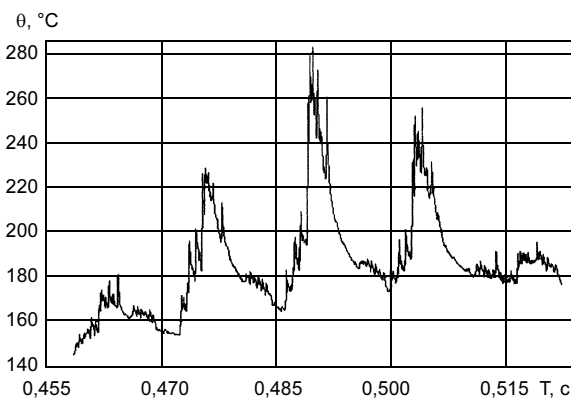


Рис. 3. Изменение температуры в зоне шлифования

это. На рис. 3 показано изменение температуры в зоне резания при шлифовании стали 9ХС алмазным кругом прямого профиля с эксцентриситетом $e = 0,002$ мм ($v_{кр} = 26$ м/с, $v_d = 1$ м/мин, $t = 0,005$ мм, $R_{кр} = 62,5$ мм). Данные получены при помощи полупроводниковой термопары. Экспериментально установлено, что за время прохождения шлифовальным кругом термопары температура в зоне резания изменяется циклически с частотой, равной частоте вращения круга.

Влияние эксцентриситета особенно важно учитывать при шлифовании сплавов, склонных к образованию тепловых дефектов, а также твердых сплавов или быстрорежущих сталей. Следует также отметить, что при эксцентриситете, превышающем некоторую предельную величину, часть периферии шлифовального круга вообще перестает срезать материал заготовки, что также неблагоприятно сказывается на качестве шлифованной поверхности. На рис. 4 приведен пример зависимости процента периферии круга, срезающего слой материала от эксцентриситета круга ($v_{кр} = 35$ м/с; $v_d = 0,05$ м/с; $t = 0,01$ мм). График получен при помощи компьютерного моделирования работы шлифовального круга с эксцентриситетом.

Для учета влияния геометрической неточности шлифовального круга прямого профиля на показатели плоского периферийного шлифования введем коэффициент k_3 , показывающий, во сколько раз максимальная величина срезаемого слоя a_{zmax} превосходит среднюю величину срезаемого слоя $a_{zср}$ при наличии эксцентриситета круга:

$$k_3 = \frac{a_{zmax}}{a_{zср}} \quad (1)$$

В результате компьютерного моделирования работы шлифовального круга прямого профиля с эксцентриситетом при плоском шлифовании периферией круга установлено, что значение коэффициента k_3 зависит от четырех кинематических факторов: эксцентриситета круга e ; отношения скорости детали

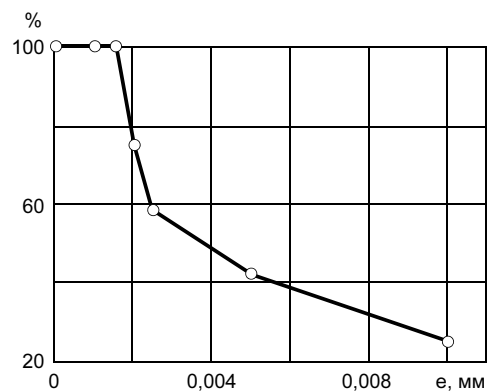


Рис. 4. Зависимость величины рабочей поверхности периферии круга от его эксцентриситета

к скорости круга $v = \frac{v_D}{v_{кр}}$ (рис. 5); глубины резания t (рис. 6) и радиуса круга $R_{кр}$ (рис. 7).

Таким образом, получаем

$$k_3 = f(e, t, v, R_{кр}). \quad (2)$$

Полученные зависимости показывают, что влияние эксцентриситета круга особенно значительно при небольших скоростях подачи и малых глубинах резания, что характерно для чистовых шлифоваль-

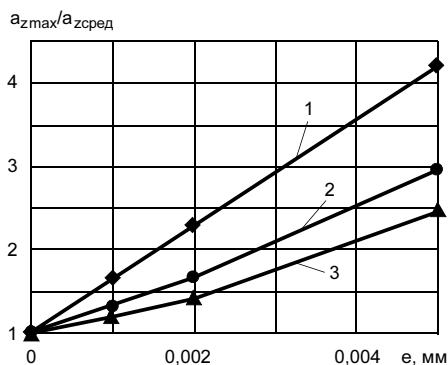


Рис. 5. Зависимость коэффициента k_3 от значения эксцентриситета круга ($R_{кр} = 75$ мм, $v_{кр} = 35$ м/с, $t = 0,01$ мм) и отношения $v_D/v_{кр}$, равного 0,05/35 (1), 0,1/35 (2) и 0,16/35 (3)

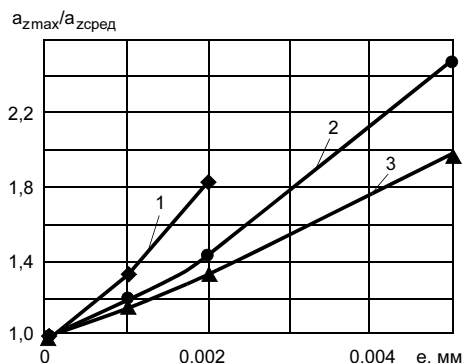


Рис. 6. Зависимость коэффициента k_3 от значения эксцентриситета круга ($R_{кр} = 75$ мм, $v_{кр} = 35$ м/с, $v_D = 0,16$ м/с) и глубины резания, равной 0,005 (1), 0,01 (2) и 0,015 (3) мм

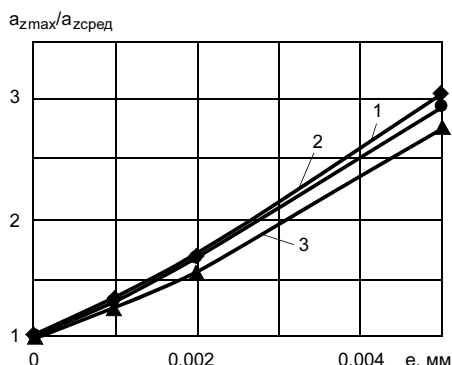


Рис. 7. Зависимость коэффициента k_3 от значения эксцентриситета круга ($v_{кр} = 35$ мм, $v_D = 0,1$ м/с, $t = 0,01$ мм) и радиуса круга, равного 62,5 (1), 75,0 (2) и 100,0 (3) мм

ных операций, на которых окончательно формируется поверхностный слой готовой детали (чистовое шлифование или заточка).

Для шлифовального круга прямого профиля радиусом $R_{кр} = 75$ мм получена полиномиальная зависимость k_3 от режимов резания и эксцентриситета круга:

$$\begin{aligned} k_3(e, v, t) &= Ae^{\bar{v}^2} + B\bar{e} + 1; \\ A &= C\bar{v}^2 + D\bar{v} + E; \\ B &= F\bar{v}^2 + G\bar{v} + H; \\ C &= -0,4762\bar{t}^2 + 1,0475\bar{t} - 0,5941; \\ D &= 1,1752\bar{t}^2 - 2,5884\bar{t} + 1,4845; \\ E &= -0,5734\bar{t}^2 + 1,2085\bar{t} - 0,6656; \\ F &= 0,8946\bar{t}^2 - 2,1473\bar{t} + 1,6788; \\ G &= -2,372\bar{t}^2 + 5,8258\bar{t} - 4,7831; \\ H &= 1,6232\bar{t}^2 - 4,158\bar{t} + 3,7376, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{e} = \frac{e}{0,001}$, $\bar{v} = \frac{v_D}{v_{кр}} \frac{1}{0,00286}$, $\bar{t} = \frac{t}{0,001}$ — нор-

мированные безразмерные показатели кинематики процесса; e — эксцентриситет круга; t — глубина резания.

Данная зависимость справедлива для следующего диапазона кинематических параметров: $e = 0 \div 0,002$ мм; $v_D/v_{кр} = 220 \div 700$; $t = 0,005 \div 0,015$ мм.

В результате проверки полученной зависимости установлено, что в заданном диапазоне кинематических параметров ее точность составляет $\pm 2,5$ %. Данную зависимость можно использовать при аналитическом определении величины и изменения сил резания, расчете распределения тепловых потоков в зоне обработки, колебаний в системе шлифовальный круг — заготовка и учете влияния дисбаланса и геометрической неточности шлифовального круга прямого профиля на показатели процесса плоского шлифования периферией круга.

Результаты, полученные в данной работе, можно использовать для рекомендаций при проектировании и производстве шпиндельных узлов шлифовальных и универсально-заточных станков, а также определении предельных значений эксцентриситета шлифовальных кругов прямого профиля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Точность обработки при шлифовании / Под ред. П. И. Ящерицына / Э. Ф. Капанец, К. К. Кузьмич, В. И. Прибыльский, Г. В. Тилигузов. Минск: Наука и техника, 1987. 152 с.
2. Теория резания. Физические и тепловые процессы в технологических системах: Учеб. для вузов / П. И. Ящерицын, М. Л. Еременко, Е. Э. Фельдштейн. Минск: Высшая школа, 1990. 512 с.

В. А. РЕШАНОВ, канд. техн. наук
ЗАО "Волгонептехиммонтаж" (Нижний Новгород)

Механизированная и автоматическая сварка двухкорпусных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров вместимостью 50 000 м³ в условиях Заполярья

В настоящее время в России развернуто строительство терминалов различного назначения с резервуарами вместимостью 20 000 м³ и более. На побережье Баренцева моря завершаются монтажно-сварочные работы при изготовлении двухкорпусных стальных вертикальных цилиндрических резервуаров вместимостью 50 000 м³ со стационарной стальной крышей основного корпуса (рис. 1).

Диаметр основного корпуса такого резервуара 60,7 м, высота стенки 18,2 м, купола крыши — 27,1 м, максимальная толщина стенки 28 мм. Диаметр защитного корпуса 66,07 м, высота стенки 15,6 м, толщина первого пояса 25 мм. Резервуары оснащены системами залива и слива нефти, ее подогрева, пожаротушения и орошения, лестницами, люками, патрубками различного назначения и другими устройствами.

Конструкцию резервуаров (проект КМ) и технологию их монтажа (проект производства работ — ППР) разрабатывали ведущие специализированные организации. Контроль за качеством монтажа и сварных соединений элементов конструкций резервуара осуществляли сотрудники инспекции Germanischer Lloyd, приглашенной предприятием-заказчиком в качестве гаранта безаварийной эксплуатации резервуаров в течение по крайней мере расчетного срока его службы.

Все элементы резервуаров изготавливали специализированные предприятия из стали 09Г2С-12 (ГОСТ 19281—89), обладающей высокой прочностью и хладостойкостью.

Сборку днища и стенки обоих корпусов резервуара проводили полистовым методом, обеспечивающим более высокую точность формы по сравнению с методом разворачивания рулонов. Крышу основного корпуса собирали из щитов заводского изготовления на специально отведенной площадке. Промежутки между

щитами перекрывали настилом, подкрепленным снизу поперечными балками и ригелями. Сборку сваривали в различных пространственных положениях, общая протяженность сварных швов различных типов превышала 36,5 км. Вместе с установкой временных приспособлений и устройств, а также сваркой прихватками общая протяженность сварных швов одного резервуара достигала 45 км.

С учетом технических возможностей и экономической целесообразности, а также практического опыта для выполнения такого объема сварочных работ назначали следующие способы сварки:

— механизированную в защитных газах — для выполнения сварных соединений днища и настила крыши, вертикальных стыков и корневого шва горизонтальных соединений стенки, врезок люков и патрубков стенки и крыши и многих других элементов резервуара;

— автоматическую под флюсом — для производства основного объема горизонтальных соединений стенки;

— ручную дугую покрытыми электродами — для выполнения большинства прихваток, сварки



Рис. 1. Общий вид двухкорпусного вертикального цилиндрического резервуара вместимостью 50 000 м³ со стационарной стальной крышей основного корпуса

Таблица 1

Стык	σ_b , МПа	α , градус	КСУ, Дж/см ² , при температуре, °С	
			20	-30
Вертикальный	508—512	127—137	42—80	36—68
Горизонтальный	511—518	132—136	56—82	34—77

Примечание. Испытания при отрицательных температурах назначены по техническим условиям ППР.

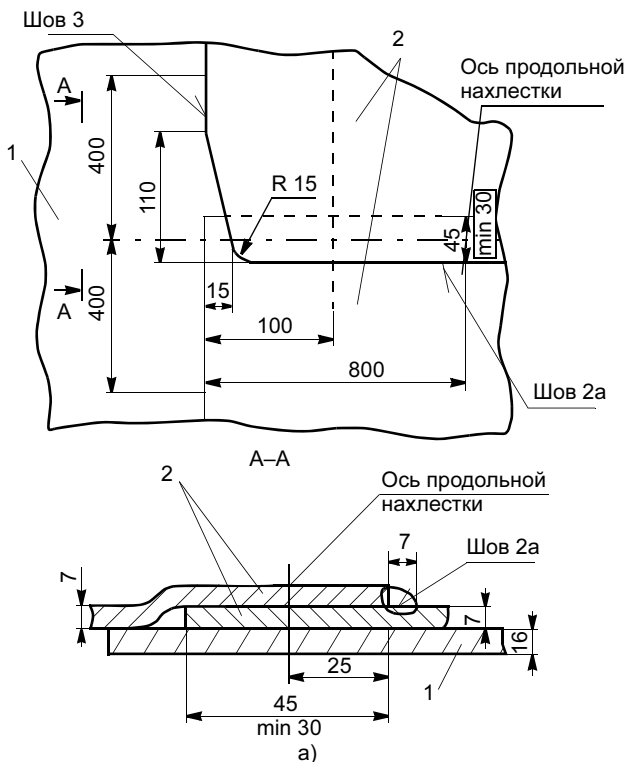


Рис. 2. Схема сварки (а) и зоны тройного нахлеста (б) центральной части днища резервуара

временных съемных приспособлений, выполнения соединений с короткими швами и в труднодоступных зонах.

Механизированную сварку производили с помощью установок KemproMig-4000 (фирма Kemppi, Финляндия), TPS-4000 (фирма Fronius, Австрия), в нижнем положении — KemproWeld-4000 (фирма Kemppi). При этом применяли сварочную проволоку ОК Autrod 12.51 (фирма ESAB, Швеция) и смесь аргона (80 %) и углекислоты (20 %) Fogon-20 (фирма Linde Gas, Германия). Смесь газов не замерзала при низких температурах и обеспечивала более высокое качество и чистоту поверхности сварных швов.

Автоматическую сварку под флюсом производили с помощью специализированной установки AGW-II, предназначенной для двухсторонней сварки горизонтальных швов на вертикальной стенке. При этом применяли сварочную проволоку L-61 и флюс FX860 (фирма Lincoln Electric, США).

Ручную дуговую сварку покрытыми электродами выполняли с применением сварочных выпрямителей ВД-306, автономных агрегатов АДД-4004 и АДД-4х 2501ВУ1 (последний производства завода сварочного оборудования "Уралтермосвар") для работы в условиях крайне низких температур. В основном сварные швы выполняли электродами УОНИИ 13/55 (производства фирмы ESAB SWELL, Россия). В особо ответственных случаях для сварки корневого слоя шва применяли электроды ЛБ-52У (Япония).

Технология сварки указанными способами, сварочное оборудование и сварщики (в том числе руководители сварочных работ) аттестованы НАКС в установленном порядке. Тем не менее при сварке каждого узла оформляли допуск на технологию и квалификацию сварщиков. Все операции, включая сборку, сварку, контроль и испытания образцов допусковых стыков, выполняли под наблюдением инспекторов Germanischer Lloyd. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

Днища состоят из окрайки 1, на которой устанавливаются стенки резервуара, и настила 2 центральной части. Последняя собирается из листовых элементов с формированием подгибов в зонах двойного (соединение двух смежных листовых элементов) и тройного (соединение двух поперечных и одного продольно расположенного элементов) нахлестов (рис. 2), что придает всем узлам высокий уровень напряженного состояния металла сварных соединений в период их формирования. Сварку выполняли в несколько приемов. Вначале сваривали поперечные соединения каждой выложенной полосы от центра симметрии листа, по ширине и к его краям, не заканчивая сварку за 150—200 мм до пе-

ресечения с продольными соединениями. Далее сваривали продольные соединения обратноступенчатым способом. Длина каждой ступени сварного шва составляла 120—150 мм при ручной дуговой сварке и 250—400 мм — при механизированной. В этом случае не сваривали края соединений, прилегающие к окрайке на протяжении 2000—3000 мм, периметр центральной части днищ и центральный

монтажный шов. Все это сваривали после сборки и сварки не менее одного—трех поясов стенок и оставшейся части стыков окрайки. Продольные соединения центральной части днища сваривали от центра к окрайке, чтобы избежать образования вздутия металла ("хлопуна") от накопления тепловых остаточных деформаций при сварке и нагреве металла.

Таблица 2

Элемент конструкции	Способ сварки	Сварочные материалы	Тип ¹ и положение шва в пространстве	Диаметр проволоки (электрод), мм	Параметры режимов сварки			Примечание	
					Сварочный ток, А	Напряжение, В	Скорость подачи проволоки, м/мин (скорость сварки, м/ч)		
Окрайка: корневой шов заполняющие облицовочный	Механизированная в защитных газах	Проволока ОК Autrod 12.51 + Fogon-20 (80 % Ar + 20 % CO ₂)	C19 (стык), нижнее	1,2	190—220	21—23	4,7—5,2	Расход газа в зависимости от силы ветра 15—65 л/мин	
Центральная часть днища: корневой шов облицовочный			H1 (нахлестка), нижнее		130—170 190—220	15—19 21—23	2,4—3,2 4,7—5,2		
			Стенка: 1. Вертикальные стыки: корневой шов заполняющие облицовочные 2. Горизонтальные стыки: корневой (подварочный) шов корневой АФ		C25 (стык), вертикальное	130—170 130—170 150—190	15—19 15—19 17—21		2,4—3,2 2,4—3,2 3,0—4,0
заполняющие облицовочные	C15 (стык), горизонтальное	130—170		15—19	2,4—3,2				
	3. Уторный шов (соединение стенки с днищем): корневые, 2—5-й слои облицовочный	Автоматическая под флюсом	—"	2,4	280—340/ 420—480	21—23/ 24—30	(15—16)	Основная/вспомогательная платформы	
Механизированная в защитных газах			Проволока L61 + флюс FX860		—"	420—480/ 400—480	22—30/ 24—30		(16—20)
						420—450/ 420—450	24—28/ 24—28		(26—45)
Крыша настила: корневой шов облицовочный	Механизированная в защитных газах	То же	H1 (нахлестка), нижнее	1,2	130—170	15—19	2,6—3,2	—	
					150—200	17—21	2,9—4,2		
Прихватка, сварка "узких зон"	Ручная дуговая покрытыми электродами	Электроды сварочные УОНИИ 13/55	Нижнее	3,0	90—130	—	—	—	
					140—180				
			Вертикальное	3,0	80—120				
					120—160				
			Горизонтальное	3,0	80—120				
					120—160				
Потолочное	3,0	70—110							
		110—140							
¹ ГОСТ 14771—76.									

На третьем этапе сваривали все, что было не сварено на первых двух этапах. Следует отметить, что сварку днищ проводили в зимний период при температуре воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и ниже, а также сильным ветре и метелях. При этом производили просушивание металла соединений и подогрев до $100\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$ газопламенным нагревом пропано-кислородными горелками. Сварку выполняли в палатках, уплотняемых во избежание сквозняков снегом. Режимы сварки приведены в табл. 2. Элементы стенки толщиной от 32 до 12 мм включительно поставляют, как правило, с недовальцованными краями протяжением 200—250 мм и перевальцованными на диаметр более 1 м при толщинах не более 10 мм. На монтаже эти недостатки заводского производства приходится устранять с помощью приспособлений и конических клиньев, что также способствует формированию напряженного состояния металла сварных соединений вертикальных и горизонтальных стыков в процессе их сварки. При монтаже стенок резервуара была выявлена неравномерность просадок грунта фундамента по их периметру. Это привело к разрушению отдельных прихваток при установке врезок заводского изго-

товления с вмонтированными в них люками и патрубками, а также усиливающими накладными листами. Эти узлы были подвергнуты термической обработке в заводских условиях в соответствии с требованиями API-650. При этом одинаковые параметры режима сварки для "сырого" и обработанного в печах металла вызывали появление у последнего подрезов, требующих исправления. Перед сваркой (рис. 3) вертикальных стыков стенки 1 (особенно его корневой зоны) в условиях низкой температуры и сильного ветра сварщики предупреждали о необходимости обеспечения непрерывного процесса горения дуги, так как нарушение этого условия приводит к несплавлениям отдельных валиков швов. Для снижения вероятности образования подрезов на термообработанном металле, а также угловых деформаций в стыках предписано не форсировать сварочный ток. При малых толщинах листовых элементов стенки 2 с целью снижения вероятности образования остаточных угловых деформаций добавляли еще одно формирующее вертикальный стык приспособление. В любом случае на верхний край стыков выставляли выводную планку. Порядок выполнения сварки вертикальных стыков стенки за-

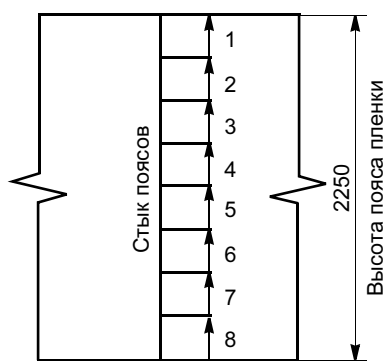
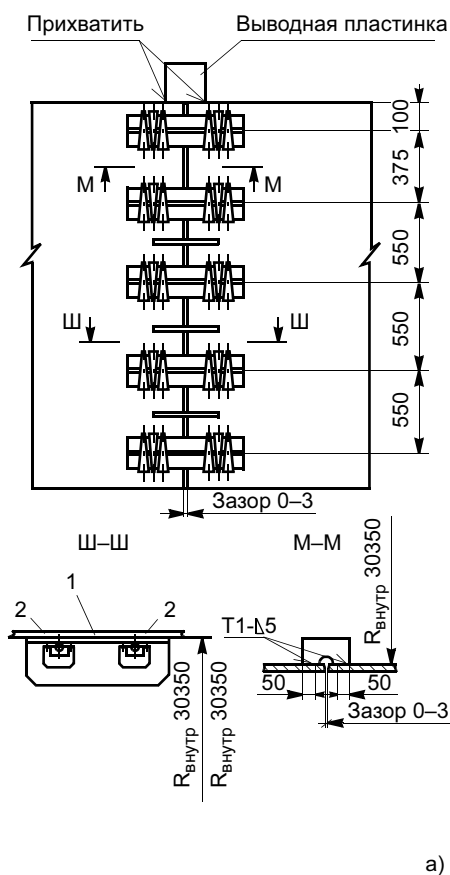
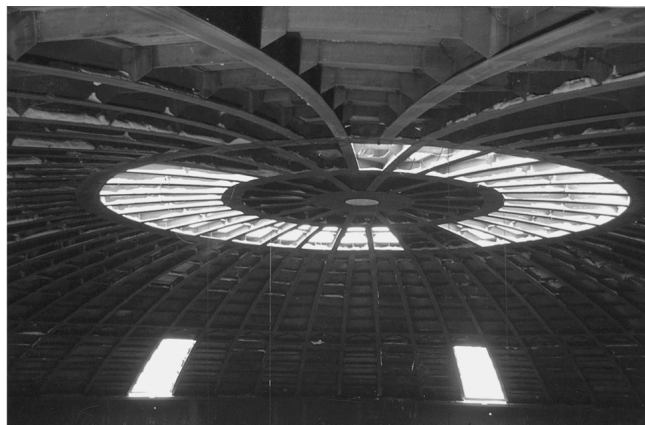


Рис. 3. Схема сварки (а) и сварной вертикальный стык (б) стенки резервуара



а)



б)

Рис. 4. Общий вид купола стационарной крыши резервуара с центральными стойками (а) и без них (б)

фиксирован в соответствующих технологических картах и приведен на рис. 3, режимы сварки — в табл. 2. Сварку вертикальных стыков стенки выполняли в следующей последовательности: вначале сваривали полностью часть шва с внешней стороны стенки; после зачистки корня с обратной стороны шва и демонтажа приспособлений сваривали шов с внутренней стороны стенки.

Горизонтальные соединения выполняли комбинированной сваркой (корень — механизированной сваркой, остальной объем — автоматической под флюсом).

Стенку толщиной не более 18 мм сваривали только автоматической сваркой под флюсом. Режимы сварки этих соединений приведены в табл. 2. При пересечении горизонтального стыка с вертикальными из-за наличия угловатости последних возможны подтеки металла шва при неплотном прилегании ремня, поддерживающего флюс, к стенке резервуара.

Сварка крыши резервуара и элементов ее опорных конструкций представляет большой интерес с точки зрения монтажа, чем сварки, поэтому опустим особенности этих процессов. Однако это уникаль-

ное сооружение (рис. 4) требует определенных навыков работы сварщиков, так как сварка элементов крыши на монтаже производится на высоте более 20 м при сильном ветре и низкой ($-20\dots-35\text{ }^{\circ}\text{C}$) температуре окружающего воздуха.

ВЫВОДЫ

1. В условиях Крайнего Севера при низкой температуре и сильном ветре монтаж резервуаров вместимостью $50\,000\text{ м}^3$ можно выполнять механизированной сваркой в защитных газах и автоматической сваркой под флюсом.

2. Данный комплекс технологий сварки, применяемых при выполнении монтажно-сварочных работ при сооружении резервуаров большой вместимости, официально соответствует основным требованиям правил и руководящей документации Ростехнадзора. Однако технологии должны быть откорректированы в соответствии с требованиями международных организаций, приглашаемых в качестве гарантов надежной эксплуатации возводимых объектов в течение по крайней мере расчетного срока их службы.

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

Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений

Ч. III. Промышленное применение процесса СТП¹

Результаты непрерывного совершенствования технологии, оборудования и инструмента обеспечили воспроизводимость качества и высокие механические характеристики соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием (СТП) — главные условия промышленного применения процесса. В большинстве публикаций [1—9 и др.] авторы отмечают преимущества СТП по сравнению с другими процессами сварки по показателям статической и усталостной прочности соединения, коррозионной стойкости, уровню сварочной деформации, трудоемкости, энергоемкости, экологической безопасности.

Прочность соединений

Сравнительные исследования свойств соединений СТП высокопрочных алюминиевых термически не упрочняемых и термически упрочняемых сплавов, например, сплавов 5083 (группы Al—Mg) и 6082 (группы Al—Si—Mg), показали, что по пределу прочности соединение сплава 5083 близко к основному материалу (коэффициент прочности $\sigma_{в\text{соед}}/\sigma_{0,2\text{осн}} \geq 0,9$). Для соединения сплава 6082 коэффициент прочности снижается до 0,65 [2] вследствие разупрочнения ЗТВ, по которой при испытании идет разрушение. У сварных образцов сплава 5083 разрушение происходит в зоне ядра шва. Установлено [1, 9], что $\sigma_{в\text{соед}}$ увеличивается при увеличении

скорости сварки и частоты вращения инструмента до определенного значения. При дальнейшем увеличении этих параметров $\sigma_{в}$ соединения сплава 5083 снижается (табл. 1), как и сплава 6082, если продолжать увеличивать скорость сварки.

Уровень усталостной прочности соединений после СТП термически не упрочняемого сплава 5083 также выше при меньшей дисперсии значений, чем термически упрочняемого сплава 6082 [9, 10].

Большое количество данных по усталостным характеристикам соединений СТП в обобщенном виде введено в Европейские рекомендации по проектированию конструкций из алюминиевых сплавов, работающих в условиях усталости (ECCS 68.1992), а также в британский стандарт BS 8118, ч. 1 "Использование алюминия в конструкциях".

Опубликованные результаты исследований процесса СТП и свойств соединений алюминиевых сплавов разных групп легирования подтверждают необходимость разработки для каждого из сплавов параметров режима сварки, соответствующих его термомеханическим характеристикам. С этим, по-видимому, связано появление большого количества публикаций о технологии и свойствах соединений СТП алюминиевых сплавов разных марок:

2024 [11, 12], 2095 [13], 2195 [14], 2524 [15], 7010 [16], 7050 [17], 7075 [11, 18—20], а также AMg6 с 1201 [21, 22] и D19 с 1420 [23] и других сплавов.

Результаты испытания соединений сплавов 2014, 7075 [19] и 1201, AMg6 [22] на общую коррозию, межкристаллитную коррозию и коррозию под напряжением в агрессивной среде, в том числе в контакте с компонентами топлива, показывают значительное преимущество СТП перед сваркой плавлением. Также сообщается о высоких показателях механических свойств соединений алюминиевых сплавов 5083 [24], 1201 и AMg6 [22] при криогенной и повышенной температурах (рис. 1), что обеспечило возможность использования соединений СТП в конструкции топливных емкостей и баков изделий авиакосмоса.

В последние годы увеличилось число публикаций по результатам разработок и исследований процесса СТП разных типов соединений — нахлесточных [25—28], угловых [29], тавровых [30, 31]. Однако в этих работах при СТП тавровых и угловых соединений не обеспечено формирование галтелей с плавным сопряжением поверхностей элементов профиля. Такое соединение имеет небольшой ресурс при циклических нагрузках и благоприятные условия для развития коррозии.

Таблица 1

Параметр	Сплав 5083					Сплав 6082			
	15	10	10	6	6	10	10	5	5
Толщина пластин, мм	15	10	10	6	6	10	10	5	5
Скорость сварки, см/мин	4,6	6,6	9,2	3,2	13,2	26,4	37,4	53	75
$\sigma_{в}$, МПа	318	344	331	312	303	226	236	254	254

¹ Ч. 1, 2 — см. "Технология машиностроения", 2007, № 8, 10.

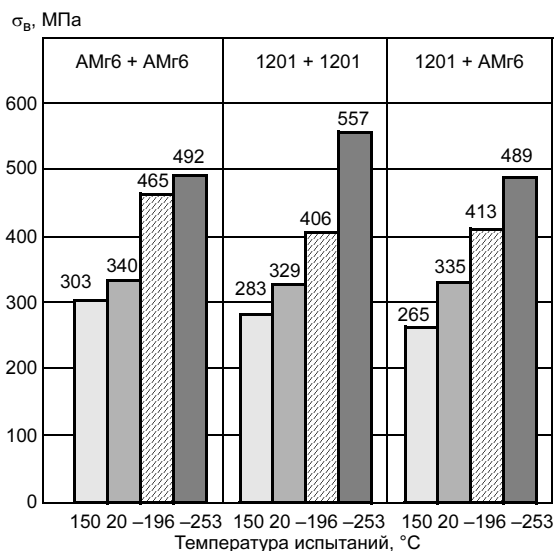


Рис. 1. Механические свойства соединений, полученных фрикционной сваркой (приведены минимальные значения, испытывали пять образцов толщиной 4,0 мм)

Большое внимание авторы уделяют исследованию особенностей процесса сварки нахлесточных соединений, что связано с востребованностью их для многих изделий. Работоспособность данного соединения авторы работы [25] предложили оценивать по критерию EST (эффективной толщине листа, определяемой расстоянием от наружной поверхности шва до линии пересечения контактных поверхностей соединяемых листов с границей шва) (рис. 2). Чем меньше изгиб контактных поверхностей вблизи шва, тем больше EST и прочность соединения. В работе [25] получен коэффициент прочности, равный 0,86 для нахлесточного соединения, полученного СТП

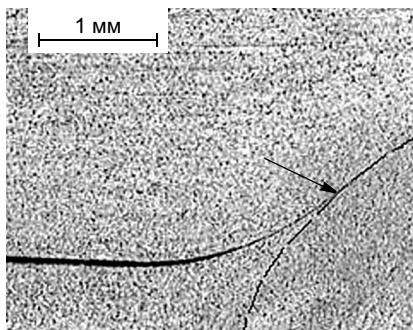


Рис. 2. Линия пересечения контактных поверхностей соединяемых деталей с границей шва (отмечена стрелкой)

сплавов 2024 (верхний лист толщиной 3 мм) и 7075 (нижний лист).

Заметно возросло число публикаций по исследованию процесса СТП материалов с более высокой, чем у алюминиевых сплавов, температурой перехода в пластическое состояние, например, сплавов магния AZ31 [32] и AZ91 [33], меди и медных сплавов [34, 35], титановых сплавов [36—38] и сталей [39—42]. В этих и других работах отмечается, что до практической реализации процесса СТП в производстве ответственных титановых и стальных конструкций должны быть проведены дополнительные исследования и разработки по совершенствованию инструмента, оборудования и технологического процесса с целью получения устойчивых результатов по формированию соединения и его рабочим характеристикам.

Сложные сварные конструкции могут содержать соединения разноименных и разнородных материалов. Судя по публикациям, процесс СТП разноименных алюминиевых сплавов широко исследовался [4, 8, 22, 23, 43—46]. Отработаны технологии и получены рабочие характеристики соединений алюминиевых сплавов разных групп легирования в разноименном сочетании, превосходящие

аналогичные при сварке плавлением и вполне приемлемые для практического использования в конструкциях изделий ответственного назначения.

В значительно меньшей степени готов к промышленному применению процесс СТП разнородных материалов (с большим различием термомеханических характеристик). Имеются сведения об исследованиях процесса СТП соединений разнородных материалов, например, в сочетаниях алюминиевый сплав с магниевым сплавом [47], медным сплавом [48] и сталью [49—52]. Получены некоторые представления об особенностях процесса, сформулированы требования к ориентации инструмента относительно линии стыка, определена область оптимальных скоростей вращения инструмента и другие параметры, например при СТП алюминиевого сплава 5083 с низкоуглеродистой сталью S400 [52]. Прочность соединения при этом составила 0,86 прочности основного материала (алюминиевого сплава).

Применение СТП разнородных материалов в промышленном производстве изделий ответственного назначения, по мнению авторов публикаций, будет возможным после проведения дополнительных исследований и разработок.

В последние пять лет основными видами неразрушающего контроля соединений, полученных СТП, остаются визуальный (оптический) контроль и УЗК [53], в том числе автоматический (аппаратура УЗК встраивается в установку). Следует отметить попытку использовать в качестве неразрушающего метода контроля акустическую эмиссию [54]. Авторы считают, что этим методом можно получать полезную информацию о дефектах в шве, поскольку дефекты разных типов дают разные сигналы, которые по-разному отражаются на частотных диаграммах.

Таким образом, из анализа публикаций следует, что к промышленному применению можно счи-

тать практически подготовленным процесс СТП алюминиевых сплавов в одноименном и разноименном сочетаниях.

Оборудование

Передовой производитель сварочного оборудования — концерн ESAB — включил в свою производственную программу установки для СТП [55]. Программа Super Stir™ содержит несколько установок, разработанных на базе стандартной установки, на которой можно сваривать изделия размером от 0,5 × 1,5 до 10 × 20 м. Разные модели этих установок имеют консольную или порталную конструкцию. Установки полностью автоматизированные, с одинаковым принципом действия, смонтированы на мощной раме, рассчитанной на большие нагрузки. Сварочные головки перемещаются по сверхпрочной станине от системы речечного привода. Концерн ESAB совместно с исследовательским центром разработал серию установок, которые применяются в космической, авиастроительной, судостроительной, автомобилестроительной, энергетической и других отраслях промышленности.

В настоящее время ESAB предлагает новую серию установок LEGIO™ для ротационной сварки (PCT) (рис. 3) [55, 56], позволяющих сократить затраты на

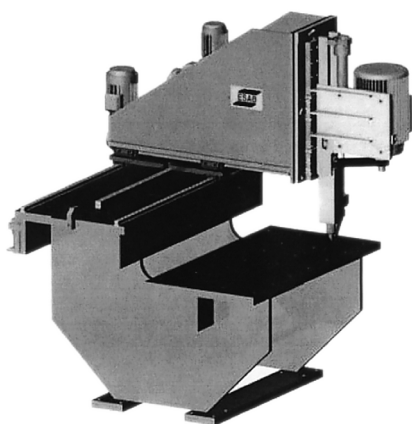


Рис. 3. Модульная установка ESAB LEGIO™ — "FSW 3 UT"

Таблица 2

Тип установки PCT	Усилие прижатия, кН	Мощность шпинделя, кВт	Толщина свариваемых материалов, мм			
			6000	5000	2000 и 7000	Медь (без кислорода)
1	6	3	3	2	1,5	0,8
2	12,5	5,5	5	3,5	2,5	1,5
3	25	11	10	7	5	3
4	60	18	18	10	9	7
5	100	22	35	20	18	12
6	150	45	60	40	35	25
7	200	90	100	75	70	40

приобретение и время на производственное освоение. Установки LEGIO™ представляют стандартизованную модульную систему, способную решать технологические задачи сварки изделий в большом диапазоне толщин (табл. 2). Такая установка (см. табл. 2, тип 3) действует, например, на верфи Estaleiros Navais do Mondego S. A. в Португалии. Установка размещена в цехе вблизи линии общей сборки корпуса корабля. На ней методом СТП изготавливают крупногабаритные панели с высокой точностью.

Серия установок LEGIO™ состоит из пяти базовых моделей-компоновок: S, ST, U, UT — с одной сварочной головкой и ST — с двумя головками (для сварки полых панелей); S и ST — для сварки прямолинейных швов (по двум координатным осям), U, UT — по трем координатным осям. Установки поставляются двух видов: напольная с вертикальной стойкой для сварки кольцевых швов и с низко расположенными шпиндельными головками для двусторонней сварки.

На ранней стадии освоения процесса СТП (в 90-х гг.) практически только фирма ESAB производила специализированные установки для этого процесса и поставляла их по всему миру. Установки были поставлены и введены в действие на фирме SAPA (Швеция, Финляндия) для сварки из прессовок крупногабаритных полых панелей размером 14,5 × 3 м для судостроения (корпуса судов, морские платформы, высокоскоростные паромы, палубные надстройки судов и т. п.) [10, 57]. Одна

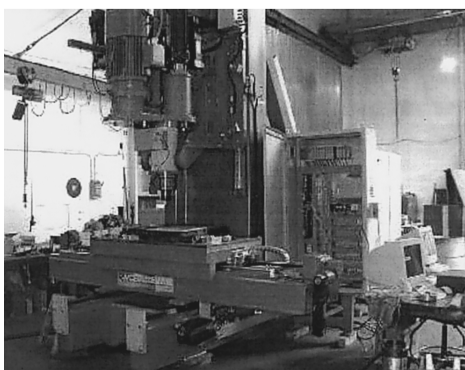
из первых установок была поставлена на фирму Marine Aluminium (Норвегия), на которой панели из прессованных профилей укрупняют СТП до размера 14,6 × 6 м для судостроения и железнодорожного подвижного состава [58]. Ежегодно фирма SAPA прессует на 22 прессах и укрупняет СТП на установке Super Stir™ около 180 000 т панелей размером 14,5 × 3,0 м, тогда как на самом мощном прессе P-5 можно получить панель шириной 400 мм [59]. Фирма BOEING приобрела установки для СТП продольных (длинной до 15,3 м) и кольцевых (диаметром до 6 м) швов топливных баков ракет серии "Delta" [53] на четырех производственных предприятиях в разных штатах США.

В настоящее время большое число фирм в разных странах производят оборудование для СТП. Британский институт сварки (TWI) разработал серию машин типа FW для СТП деталей размером до 3,4 × 4 м и толщиной до 15 мм (односторонняя сварка) и до 50 мм (двусторонняя). В Галифаксе (Великобритания) компания Crawford Swif изготовила для компании BAЕ System в Филтоне трехкоординатную установку Power Stir™-360, рассчитанную на усилие 100 кН. Эта установка предназначалась для СТП экспериментальных конструкций крыльев и обшивки фюзеляжа больших самолетов, в частности AIRBUS А3ххх и других самолетов [10].

Американская фирма NOVATECH Engineeng INC производит промышленные и экспериментальные установки типа Н10К (горизонтальные) и С10К (верти-



а)



б)

Рис. 4. Установки для СТП фирмы NOVA-TECH Engineering: а — горизонтальная; б — вертикальная



Рис. 5. Установка для СТП FSWJ2XBJ020 (КНР)

кальные) (рис. 4) для СТП кольцевых и продольных соединений емкостей. Установки рассчитаны на усилие до 45 кН по оси шпинделя и до 22 кН по нормали к оси шпинделя. Имеется система компьютерного цифрового контроля по CNC-программе усилий для регулирования положения инструмента относительно поверхности деталей с регистрацией данных. MTS System Co (США) в сотрудничестве с другими компаниями получила несколько патентов по конструкции сварочной головки и инструментов, а также разработала систему ISTIR™ PDS Jr. управления положением инструмента относительно поверхности стыка, применение которой обеспечило возможность соединения элементов двойной кривизны.

В последние годы в КНР также расширяется разработка и применение СТП [60]. Создан специализированный Центр СТП, в котором в течение двух лет изготовлены и поставлены заказчикам 16 установок разных типов:

— установка консольного типа FSW J2XBJ020 (рис. 5) для двухкоординатной сварки цилиндров (диаметром 2000 мм) из алюминиевых сплавов с толщиной стенки до 20 мм продольными (до 1700 мм) и кольцевыми швами. Перемещение по осям X и Z составят 1700 и 300 мм соответственно;

— установка С-типа FSWJ4CXJ006 для трехкоординатной сварки ма-

рых цилиндров из сплавов алюминия с толщиной стенки до 6 мм кольцевыми швами и панелей продольными швами длиной до 400 мм. Перемещение по осям X, Y и Z — 400, 260 и 150 мм соответственно;

— установка порталная типа FSWJ3LMJ012 для сварки продольными швами профилей и панелей толщиной до 12 мм из алюминиевых сплавов. Перемещение по осям X, Y и Z — 1700, 1000 и 300 мм соответственно.

Можно было бы продолжить перечень фирм, изготавливающих оборудование для СТП. Большое число фирм, изготавливающих оборудование для этого процесса, создали материально-техническую основу для расширения области его применения в разных отраслях промышленности.

Промышленное применение СТП

Первым изделием, в производстве которого использовали СТП, были сотовые панели холодильной установки для быстрого замо-

раживания рыбы на рыболовческих судах [61, 62]. Для большей эффективности производственной линии непосредственно в нее встроены пресс мощностью 65 МН и оборудование для СТП. Сварка производится одновременно с двух сторон. Холодильная установка содержит 17 панелей длиной 16 м и толщиной 30 мм. Процесс наблюдается дистанционно посредством видеокамер и параметры его контролируются автоматической системой мониторинга.

Фирма BOEING (США) также находится среди первых компаний, реализующих преимущества процесса СТП. Фирма уже несколько лет использует СТП для изготовления ракет серии Delta [53]. Переход с аргодуговой сварки на СТП при изготовлении топливных баков ракет (рис. 6) позволил снизить почти в 2 раза стоимость сварки [63] и улучшить качество швов. За первые четыре года было выполнено свыше 2,5 км бездефектных швов при СТП панелей из алюминиевого сплава 2014. В настоящее время фирма BOEING производит с примене-

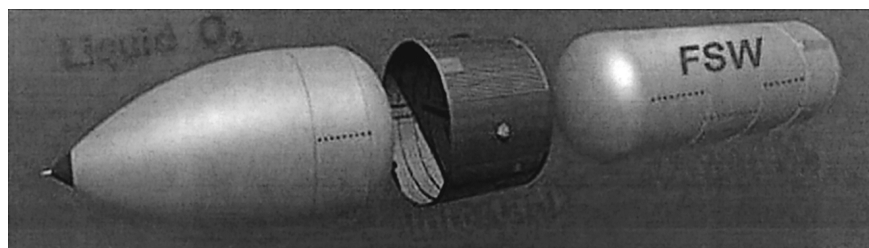


Рис. 6. Баки ракеты, сваренные СТП

нием СТП топливные баки ракеты Delta IV диаметром более 5 м.

Фирма BOEING использует процесс СТП при изготовлении самолетных конструкций. Криволинейные соединения створок шасси самолета из сплава 7075 сваривают СТП внахлестку [30]. При этом применяется запатентованный силовой привод с адаптивной системой регулирования глубины погружения инструмента по действующему на него усилию.

Применяют СТП также при изготовлении сварной конструкции обтекателя истребителя, успешно прошедшего летные испытания. К Т-образным ребрам жесткости из сплава 7050 приваривают СТП обшивку из сплава 7075 толщиной 1,8 мм. Ребро жесткости воспринимает усилие с опорного бурта инструмента и обеспечивает устойчивость конструкции руля (рис. 7, а). Авторы отмечают недостаточно высокую усталостную прочность такого таврового соединения. Разрушение соединения при испытании идет по надрезам между жесткостью и обшивкой (рис. 7, б), по месту 1 — у 75 % и по месту 2 — у 25 % образцов (см. рис. 7).

Компания BOEING развивает свои проекты и для Вооруженных Сил США. Одна из задач — обеспечение воздушной перевозки тяжелых грузов и быстрой их перегрузки. Для этого разработана конструкция поддона (рис. 8, а) грузового отсека самолета C17 Globemaster III. Поддон может перемещаться вместе с закрепленным на нем грузом из грузового отсека на армейскую платформу CROP's [31]. На рис. 8, б приведены секции поддона и поперечное сечение соединения секций поддона после испытания в распрыленном солевом растворе в течение шести недель.

Компания Lockheed-Martin Laboratories в Балтиморе (США) и Reynolds Aluminium по поручению NASA заменили в конструкции внешнего бака шаттла [64] сплав Al 2219 на разработанный ими алюминий-литиевый сплав 2195.

При решении проблем свариваемости сплава и качества соединения также используется процесс СТП. В настоящее время топливные баки (рис. 9) изготавливает фирма Lockheed-Martin Space Company в Новом Орлеане.

Авиационная компания Airbus GmbH (DA) и аэрокосмическое агентство (Daimler/Chrysler AG) проявили интерес к процессу СТП [65] благодаря преимуществ

ву в таких показателях, как масса конструкции, прочность соединения, особенно усталостная, и стоимость. Рассматривался вопрос о применении СТП для выполнения соединений в конструкции планера, включая фюзеляж, пассажирские кабины, вертикальные стабилизаторы, крылья, и окончательной сборки узкофюзеляжных самолетов. Для конструкции самолетов серии A3xxx Airbus [66]

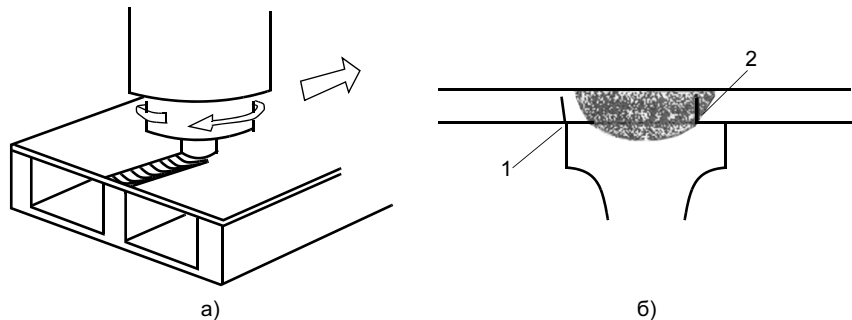


Рис. 7. Схема СТП коробки руля обтекателя (а) и контур шва в поперечном сечении таврового соединения (б)

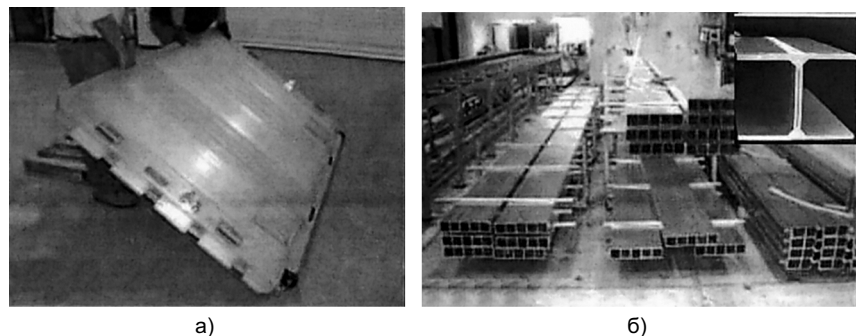


Рис. 8. Перегрузочный поддон грузового отсека самолета (а), секции поддона и поперечное сечение соединения секций поддона (б)

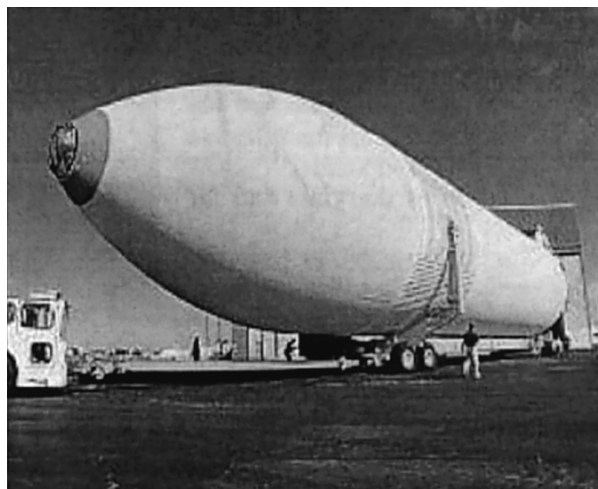


Рис. 9. Боковой топливный бак шаттла

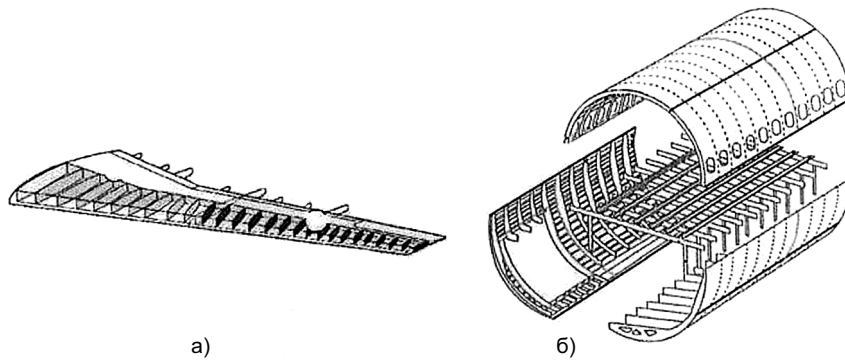


Рис. 10. Элементы крыла (а) и панели фюзеляжа (б) самолета AIRBUS 380, соединяемые СТП (Европейский проект TANGO — технологии и применение в авиационии)

разрабатываются процессы СТП, главным образом продольных стыковых швов фюзеляжа, крыльев, центрального кессона крыла (рис. 10). Компания Airbus рассчитывает на эффект от использования СТП в конструкции крыльев из алюминиевых сплавов групп 2xxx и 7xxx при изготовлении самолетов A318, A380 [67].

Авиационная компания Eclipse Aviation применяет СТП в производстве пятиместного самолета бизнес-класса Eclipse 500 [68, 69]. Концепция конструкции крыла самолета основывается на использовании СТП при изготовлении жестких стрингерных панелей из алюминиевых сплавов групп 2xxx (обшивка) и 7xxx (стрингеры) в одноименном и разноименном со-

четаниях (рис. 11). Очень важна возможность проведения ремонта повторной СТП. Для реализации процесса СТП компания Eclipse Aviation построила специальный производственный центр, обеспечивающий изготовление 1500 самолетов в год.

Следует также отметить разработку "Боинга" совместно с компанией Lockheed-Martin по изготовлению с использованием СТП конструкции полов самолета C130 из сплавов алюминия групп 2xxx и 7xxx [70].

Компания Fokker Space сообщает [71] о разработке корпуса двигателя главной криогенной ступени пусковой установки "Ариан 5", носовая часть которого состоит из 12 интегральных плоских пане-

лей из алюминиевого сплава 7075 с элементами жесткости. Конструкция модернизирована под нахлесточное соединение панелей СТП (вместо болтового соединения) в специально разработанном кондукторе (рис. 12). Исследования и испытания соединений СТП показали их значительное преимущество перед болтовыми и заклепочными соединениями: повышаются прочность и жесткость конструкции, снижается масса двигателя и стоимость его изготовления.

Одна из основных областей применения технологии СТП — судостроение, где широко используются сварные панели [10], отличающиеся хорошей плоскостностью (рис. 13, а), размером 1250 × 5000 мм из алюминиевого сплава 5083, стойкого против коррозии в морской воде [73], а также сотовые панели (рис. 13, б) с высоким шумопоглощающим эффектом для стен корабельной каюты и железнодорожных вагонов. Сообщается о других морских объектах возможного применения СТП: катера-катамараны, нефтедобывающие платформы, рефрижераторы, посадочные платформы для вертолетов, мачты и боны, например парусных яхт, и др. Морское ведомство (Регистр Флойда) разработало руководящее

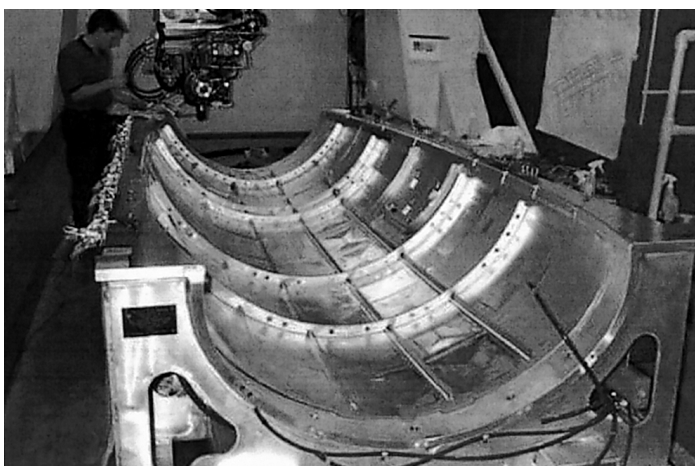


Рис. 11. Панель кабины самолета ECLIPSE 500 со стрингерами и шангоутами, приваренными СТП к обшивке

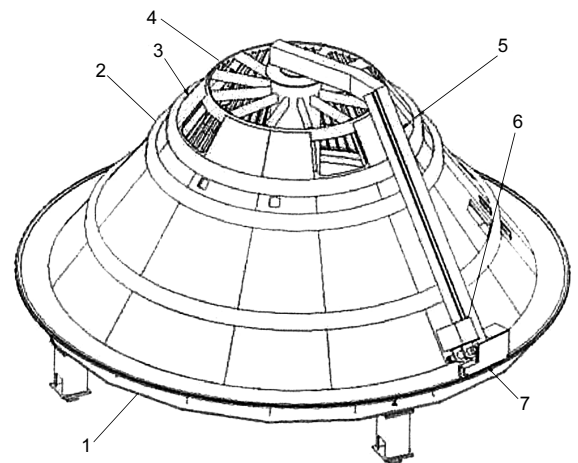


Рис. 12. Схема кондуктора для сборки под СТП носовой части корпуса двигателя Ariane 5: 1 — нижняя опора; 2 — кольцевые рамы; 3 — соединяемые панели; 4 — верхняя опора; 5 — опорная балка для СТП; 6, 7 — тележки для осевого и радиального перемещения при СТП

указание, где определило сферу новых разработок, на основании которых должен быть создан стандарт на технологию СТП [59].

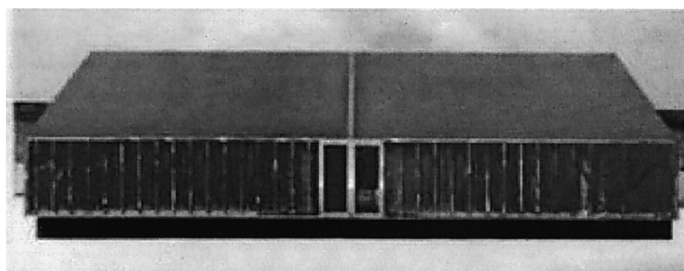
Успешно применяется технология СТП в производстве подвижного состава железнодорожного транспорта [10, 72]. Современные вагоны в последнее время все чаще выполняют из алюминиевых экструдированных профилей и интегрированных жестких панелей. Большого успеха в освоении СТП алюминиевых конструкций подвижного состава железных дорог достигло вагоностроение в Японии. Широко применяют крупногабаритные полые панели преимущественно из сплава 6N01 (0,7 Mg; 0,6 Si; 0,1 Cu) в связи с его хорошей способностью к прессованию и малой чувствительности к закалке, и из сплава 5083 ввиду его высокой прочности. Оребренные панели размером 1300 × 5000 мм, выполненные СТП, используются для пола суперэкспресса Shinkansen. Большие (1800 × 3000 мм) криволинейные с радиусом кривизны 2600 мм сотовые панели, сваренные СТП с лицевой и противоположной сторон, используются для стен вагона (рис. 14). В работе [72] отмечается, что при пробеге скоростного экспресса ТЕС 700 Shinkansen 450 тыс. км со скоростью до 285 км/ч разрушения не возникли, снизились вибрация и шум.

Следует отметить совместную разработку Университета в Аделаиде (Австралия) и TWI [74] модульной конструкции переносной машины с гидравлической системой автоматического управления условиями контакта инструмента со стыком. С помощью этой машины два оператора без использования крана выполняют СТП криволинейного шва в условиях монтажа поперечных швов носовой части круизного судна¹. После сварки панели с толщиной листа 5 мм из алюминиевого

¹ Патент WO98/38084 (Австралия).



а)



б)

Рис. 13. Плоская сварная панель, выполненная СТП для судостроения (а), и сотовая (б) — для вагоностроения

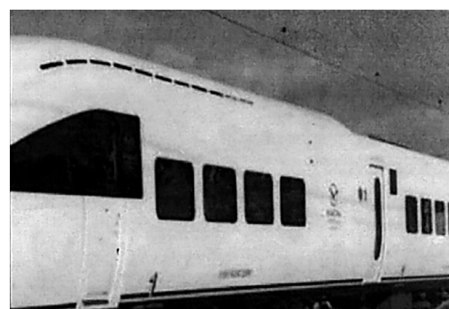
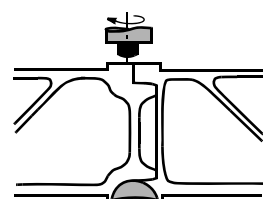
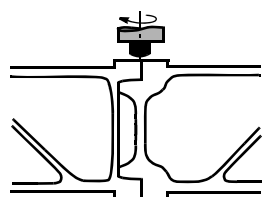
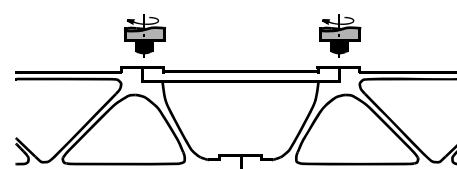
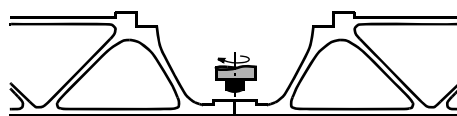


Рис. 14. Стыки полых панелей вагонов двух серий (HITACHI)

сплава 5083 подвергают формовке взрывом.

Преимущества СТП оценены многими автомобильными компаниями, в частности, при производстве пространственных рам кузовов [10], деталей шасси, топливных баков, корпусов автобусов и других транспортных средств. В Норвегии предложена технология соединения СТП двух частей автомобильного колеса², освоённая фирмой Hydro Aluminium. Это позволило разработать концепцию интегральной конструкции колеса с литой центральной частью, соединённой СТП с деформированным ободом колеса [75]. В работе [76] сообщается о хорошем результате, полученном при СТП пространственных деталей из литейного магния для автомобильной промышленности с помощью трехкоординатного робота 805, обеспечивающего высокую точность позиционирования при допустимой нагрузке 45 кН.

Твердофазный процесс СТП позволяет производить сварку в любом пространственном положении, что обеспечивает возможность соединения этим методом кольцевых стыков неповоротных труб и других цилиндрических деталей. TWI сообщает о разработках технологии СТП цилиндрических емкостей³ и подобных трубных компонентов [77, 78]. Рис. 15 иллюстрирует предложенную концепцию орбитальной сварки кольцевого стыка неповоротных цилиндров с внутренней стороны одной или несколькими сварочными головками. Технология орбитальной СТП разработана, например, для соединения алюминиевых труб при монтаже газопровода [78].

Шведской фирмой Nuclear Fuel and Waste Management Co (SKB) на установке ESAB AB в 2004—2005 гг. были изготовлены с применением СТП надежно герметизированные медные контейнеры с толщи-

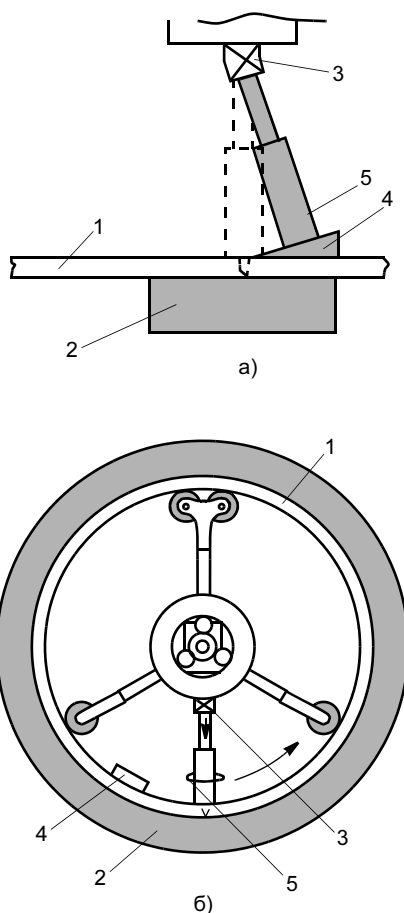


Рис. 15. Схема СТП кольцевого соединения трубы: а, б — вид сбоку и вдоль оси трубы; 1 — труба; 2 — опорное кольцо; 3 — шарнирное соединение; 4 — остающаяся клиновидная пластина для окончания сварки без кратера; 5 — сварочная головка

ной стенки 50 мм [34, 79]. Контейнеры предназначались для захоронения отработанных радиоактивных отходов в шахтах на глубине 500 м. Срок хранения — 100 000 лет. Метод контроля качества швов, разработанные лабораторией SKB совместно с Университетом (Упсала, Швеция) включают цифровую рентгенографию, УЗК и индукционный метод.

СТП применяется также в строительстве для изготовления жестких крупных панелей стен, фасадов и других компонентов сооружений. В работах [80, 81] отмечается особенно высокая технико-экономическая эффективность использования процесса

СТП в мостостроении. В 90-х гг. в Швеции была разработана концепция промышленного производства фрагментов моста из высокопрочных алюминиевых сплавов с последующей их доставкой к месту возведения моста и сборкой на месте [80]. Реализация этой технологии стала возможной с появлением СТП, которая обеспечила требуемое качество соединений прессопок из высокопрочных алюминиевых сплавов в отличие от сварки плавлением. Масса мостового полотна по новой технологии в 10 раз меньше, время возведения (сборки) моста также на порядок меньше, сварная конструкция из сплава 6005 практически не корродирует. За последние 10—15 лет в Скандинавии возведено около 100 таких мостов (в основном в Швеции). Перечисленными объектами промышленного применения процесса СТП не ограничивается, отмечены лишь наиболее крупные из них.

Несмотря на хорошие результаты многочисленных исследований и разработок, для применения СТП ответственных конструкций соответствующие департаменты (например, в аэрокосмической отрасли — NASA) требуют разработки стандартов и спецификаций. В настоящее время Международная организация по стандартизации (ISO) разрабатывает совместно с институтами стандарт ISO/AWI — 25239 по сварке трением с перемешиванием алюминия и алюминиевых сплавов (основные требования) [81]. Стандарт включает пять частей: общие положения; содержание; проектирование сварных соединений; квалификация операторов по сварке; техническое описание и ограничения в процедуре сварки; качество и требования по контролю.

Таким образом, разработка и применение процесса СТП в последние пять-шесть лет быстро развивались практически во всех промышленно развитых странах. Об этом можно судить по увеличению числа сообщений на международных симпозиумах о ре-

² Патент РСТ/№96/00254.

³ EP 0615480 B1 (Великобритания).

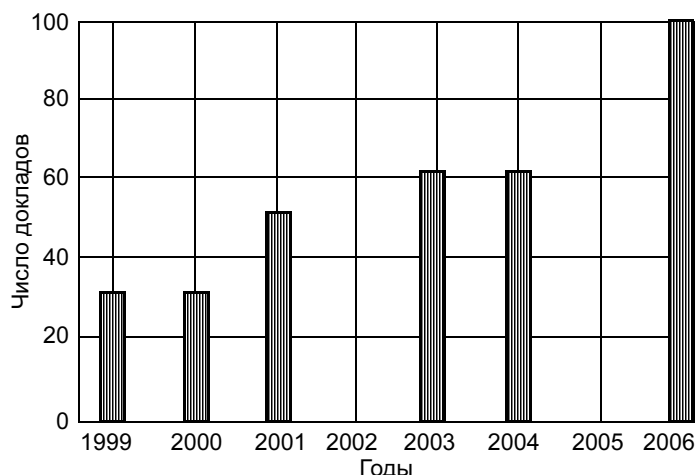


Рис. 16. Динамика роста числа сообщений на международных симпозиумах по СТП с 1999 по 2006 гг.

зультатах исследований, разработок и производственного внедрения процесса СТП (рис. 16). Следует отметить, что уже в 2000 г. на конференции в Вашингтоне (США) по вопросам СТП докладывали около 50 специалистов из 12 штатов США, большинство из которых были представителями промышленных предприятий. Такое интенсивное развитие технологии СТП и ее промышленное применение, по-видимому, изменит в глобальной перспективе количественное соотношение методов сварки, используемых в промышленном производстве и строительстве.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. <http://sdmines.sdsmt.edu/sdsmt>
2. *Microstructure and properties of friction stir welded aluminium* / J. Karlsson, B. Karlsson, H. Larsson et al. // INALCO'98, 7th International Conference "Joints in aluminium". Cambridge, UK. 1998.
3. *Enomoto M.* FSW: research and industrial applications // *Journal of light metal welding construction*. 2002. Vol. 40. N 10. P. 59—63.
4. *Tanaka S.* et al. Joining dissimilar alloys between AA5083 and A6N01 by friction stir welding // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
5. *Allehaux D.* et al. Microstructure and properties of a friction stir welded 7349-T6 aluminium alloy // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
6. *Mishina O. K., Norlin A.* Lap joints produced by FSW on flat aluminium ENAW — 6082 profiles // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.

7. *Nagano Y.* et al. Mechanical properties of aluminium die castings joined by FSW // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
8. *Steuwer A.* Influence of welding speed on the properties of AA5083-AA6082 dissimilar FSW's // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, Canada. 2006.
9. *Larsson H., Karlsson L., Swensson L.* Friction stir welding of AA5083 and AA6082 aluminium // *Svetsaren*. 2000. N 2. P. 6—10.
10. *Nicholas E. D., Kalle, Stephan W.* Friction Stir Welding — a decade on // IIV Asian Pacific International Congress, Sydney, 2000.
11. *Properties of friction stir welded joints in the aluminium alloys 2024, 5083, 6082/6060 and 7075* / J. K. Kristensen, C. D. Donne, T. Ghidini et al. // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
12. *A study on material flow of AA2024-T351 and AA6056-T4 alloys* / R. Zettler, S. Lomolino, J. F. Santos et al. // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
13. *Atallah M. M., Salem H. G.* Effect of FSW process parameters on the mechanical properties of the as-welded and post-weld heat treated AA2095 // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
14. *Colligan K.* et al. FSW of thick section 5083-H131 and 2195-T8P4 aluminium plates // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
15. *Yan J., Sutton M. A., Reynolds A. P.* Process—Structure—property relationship for nugget and HAZ region of AA2524-T351 FSW joints // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
16. *Norman A. F.* et al. The effect of welding condition on the microstructure and mechanical properties of the nugget

- zone in AA7010 alloy friction stir weld's // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
17. *Baumann J. A., Lederich R. J., Mishra R.* Evolution of thick section friction stir welding of 7050 aluminium alloys // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
18. *Marie F.* et al. Development of friction stir welding of 7000 series extrusions for central wing box applications // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
19. *Leonard R.* Corrosion resistance of friction stir welds in aluminum alloys 2014A-T651 and 7075-T651 // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
20. *Santos J. F.* Robotic friction stir welding of 7075 alloy (late substitution — manuscript not on CD // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
21. *Фрикционная сварка листовых конструкций из алюминиевых сплавов 1201 и АМг6* / М. М. Штрикман, В. А. Половцев, Г. В. Шилло и др. // *Сварочное производство*. 2004. № 4. С. 41—47.
22. *Служебные характеристики соединений алюминиевых сплавов 1201 и АМг6, выполненных фрикционной сваркой* / В. А. Половцев, М. М. Штрикман, Г. В. Шилло и др. // *Технология машиностроения*. 2006. № 4. С. 30—34.
23. *Особенности формирования соединения из разнородных алюминиевых сплавов Д19 и 1420 при фрикционной сварке линейных швов* / М. М. Штрикман, А. А. Филатов, А. А. Гельман, Л. Б. Бер // *Сварочное производство*. 2005. № 1. С. 15—21.
24. *Hayashi M.* et al. Mechanical properties of friction stir welded 5083 aluminium alloy at cryogenic temperatures // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
25. *Cederqvist L., Reynolds A. P.* Factors affecting the properties of friction stir welded aluminium lap joints // *Welding Journal*. 2000. N 12. P. 281—287.
26. *Matsumoto K.* et al. Lap joints of aluminium alloys by FSW // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
27. *Characterization of weld quality by different sensing techniques in friction stir welding of lap joints* / D. Jandric, C. Chen, M. Valant, R. Kovacevic // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
28. *Martin W.* FS lap welding methods for manufacturing efficient large scale spaceflight pressure vessels // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, Canada. 2006.
29. *Colligan K., Ternan K., Pickens J. R.* FSW of thick section corner joints in aluminium alloys // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
30. *Friction stir welding of airframe structures* / R. Talwar, D. Bolser, R. Lederich, J. Baumann // 2nd International

- Symposium on FSW. Gothenburg, Sweden. 2000.
31. *An innovative, low cost friction stir welded cargo handling solution for the C-17 Globemaster III for reducing manufacturing cost and logistics support* / R. Talwar, R. Lederich, D. Bolser, A. Garsia // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 32. *Park S. H., Sato Y. S., Kokawa H. Texture effects on tensile properties in friction stir weld of a magnesium alloy AZ31* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 33. *Volovitch P., Masse J.-E., Baudin T. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded Mg alloy AZ91* // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 34. *Cederqvist L. Welding on millennium* // Svetsaren. 2005. N 2. P. 30—32.
 35. *Friction stir weldability of copper alloys* / K. Savolainen, J. Mononen, T. Saukkonen et al. // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 36. *Russell M. J., Blignault C. Recent developments in FSW of Ti alloys* // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, Canada. 2006.
 37. *Bernath J. J. FSW of Ti—6Al—4V structural components* // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, Canada. 2006.
 38. *Loftus Z. FSW of 5 mm Ti—6Al—4V* // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, Canada. 2006.
 39. *Innovative technology applications in FSW of high softening temperature materials* / C. D. Sorensen, T. W. Nelson, S. M. Packer, R. J. Steel // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 40. *Park S. H. C., Sato Y. S., Kokawa H. Effect of microstructure on corrosion of friction stir welded 304 stainless steel* // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 41. *Okamoto K. et al. Metallurgical and mechanical properties of friction stir welded stainless steels* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 42. *Johnson R., dos Santos J. F. Mechanical properties of friction stir welded S355 C—Mn steel plates* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 43. *Nerman P., Andersson J. Fatigue strength of mixed Al joints performed with FSW* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 44. *Shinbaynagi T., Maeda M. Characteristics of microstructure in dissimilar FSW joints of 5083/6061 Al alloys* // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 45. *Mercado U. A. et al. Fatigue and corrosion properties of friction stir welded dissimilar aluminium alloys* // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 46. *Gerard H., Ehrstrom J. C. Friction stir welding of dissimilar alloys for aircraft* // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 47. *Park S. H. C. et al. Dissimilar FSW of Al alloy 1050 and Mg alloy AZ31* // JWC-Korea. 2002.
 48. *Savolainen K. FSW of dissimilar metal joints of Cu and Al* // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, Canada. 2006.
 49. *Yoshikawa K. A joining criterion for lap joining of dissimilar metal materials of aluminium and stainless steel by friction stir* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 50. *Yasui T., Ishii T., Shimoda Y. Friction stir welding between aluminium and steel with high welding speed* // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 51. *Soundararajan V., Kovacevic R. FSW of steel to Al alloys* // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal, Canada. 2006.
 52. *Kimpong K., Watanabe T. Friction stir welding of aluminium alloy to steel* // Welding Journal. N 10. 2004. P. 277—282.
 53. *Johnsen M. R. Friction Stir welding takes off at Boeing* // Welding Journal. 1999. N 2. P. 35—39.
 54. *Chen C., Kovacevic R., Jandric D. Acoustic emission in monitoring quality of weld in friction stir welding* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 55. www.esab.com — Каталог продукции ESAB: "Автоматическая сварка".
 56. *Lahiti K. et al. Rotation friction welding — the possibilities in shipbuilding* // Svetsaren. 2003. N 1. P. 6—8.
 57. *Benson P. G., Backlund J. T. Possibilities with aluminium extrusions joined by friction stir welding* // 4th International Forum on aluminium ships. New Orleans, 2000.
 58. *Weman K. Equipment for aluminium welding* // Svetsaren. 2000. N 2. P. 11—13.
 59. *Backlund J., Norlin A., Andersson A. Friction stir welding opens up a new field: wide and thin aluminium panels* // United aluminium world at 4th World Congress "Aluminium 2000". 2000.
 60. www.cfswt.com
 61. *Andersson A., Norlin A., Backlund J. IBEC'97, Adventure Technology and Process. Stuttgart, Germany. 1997. 105 p.*
 62. *Midling O. et al. Friction stir welding aluminium — process and applications* // 7th INALCO Conference. Cambridge, 1998.
 63. *Rowe C. E. D., Thomas W. Advances in tooling materials for FSW* // www.innovatec.com/iom3_dt/rowe_matcong.pdf
 64. *Hartley P. Friction plug weld, repair of Space Shuttle external tank* // Welding and metal fabrication. 2000. N 9.
 65. *Lohwasser D. Application of friction stir welding for aircraft industry* // 2nd International Symposium on Friction Stir Welding. Gothenburg, Sweden. 2000.
 66. *Lohwasser D. Welding of airframes by friction stir* // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
 67. *Sherherd G. The evaluation of friction stir welded joints on airbus aircraft wing structure* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 68. *Friction stir welding system development for thin gauge aerospace structures* / B. Christner, M. Hansen, M. Skinner, G. Sylva // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 69. *Christner B., McCoury J., Higgins S. Development and testing of friction stir welding as a joining method for primary aircraft structure* // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah, USA. 2003.
 70. *Froes F. H. Fourth international symposium on FSW (review)* // Light metal Age. 2003. N 10. P. 38—40.
 71. *Applying friction stir welding to the Ariane 5 main motor thrust frame* / M. J. Brooker, A. J. M. van Deudekom, S. W. Kallee, P. D. Sketchley // 2nd International Symposium on Friction Stir Welding. Gothenburg, Sweden. 2000.
 72. *Midling O. T., Kvale J. S., Oma S. Application of prefabricated friction stir welded panels in catamaran building* // 4th International Forum on aluminium ships. New Orleans, 2000.
 73. *Kumagai M., Tanaka S. Properties of aluminium wide panels by friction stir welding* // 1st International Symposium on Friction Stir Welding. California, USA. 1999.
 74. *Henderson J. Exploiting friction stir welding in explosively — formed aluminium boat hull construction* // IIW. Asian Pacific International Congress. Sydney, 2000. P. 536-1—536-7.
 75. *Midling O. T. Friction stir welding — a valuable processing route* // Conference "Aluminium'97". Essen, Germany. 1997.
 76. *Von Strombeck A., Schilling C., dos Santos J. F. Robotic friction stir welding: tool technology and applications* // 2nd International Symposium on Friction Stir Welding. Gothenburg, Sweden. 2000.
 77. *Thomas W. M., Dolby R. E. Friction stir welding developments* // 6th International conference on Trends in welding research. Georgia, USA. 2002.
 78. *Gerhard Engelhard et al. Orbital friction stir welding of aluminium pipes* // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe, Japan. 2001.
 79. *Cederqvist L. FSW to seal 50 mm thick copper canisters — a weld that lasts for 100000 years* // 5th International Symposium on Friction Stir Welding. Metz, France. 2004.
 80. *Kluken A., Ranes M. Aluminium bridge constructions — welding technology and fatigue properties* // Svetsaren. 1995. N 3. P. 13—15.
 81. www.iso.ch/iso/en

В. Е. АРХИПОВ, канд. техн. наук, Г. В. МОСКВИТИН, д-р техн. наук,
А. Н. ПОЛЯКОВ, канд. техн. наук
Институт машиноведения им. А. А. Благонравова

Структура и свойства покрытий, полученных методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза

Задача увеличения надежности и долговечности элементов машин и механизмов непосредственным образом связана с износостойкостью трущихся сопряжений. Один из путей повышения износостойкости заключается в направленном изменении свойств поверхностей контактирующих деталей, осуществляемых как традиционными методами термической и химико-термической обработки, так и современными технологическими методами обработки поверхностей, наиболее подверженных разрушению в условиях эксплуатации. К таким современным методам относится метод самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС), который нашел применение для решения ряда технологических задач [1, 2].

В настоящее время установлено, что обработка деталей машин и механизмов методом СВС позволяет увеличить предел выносливости, повысить ресурс работоспособности деталей, работающих в условиях износа. Однако отсутствие данных о закономерностях изменения структуры материалов и формируемых покрытий при обработке методом СВС затрудняет выбор параметров технологии, обеспечивающей максимальную износостойкость конкретных деталей машин в условиях эксплуатации. Установление взаимосвязи структурного состояния покрытия, формирующегося при СВС, с его износостойкостью является базой для разработки конкретных рекомендаций использования технологии СВС для деталей, работающих в условиях трения и износа.

В данной работе представлены экспериментальные результаты по исследованию структурного состояния поверхностных слоев стали 45, обработанной методом СВС, с целью оптимизации режимов технологии для достижения высоких показателей износостойкости обработанных поверхностей.

В работе направленное изменение структуры и свойств поверхности стали осуществляли методом СВС с применением шихты, позволяющей получить покрытия на основе хрома и сочетания хрома и бора. Процесс СВС осуществлялся в режиме воспламенения шихты с ориентировочной температурой горения 1100—1150 °С и последующей выдержкой в печи обрабатываемых образцов при температуре около 950 °С в течение 1 ч. В качестве шихты использовали следующие основные компоненты: порошки алюминия, оксида хрома, бора. Обрабатываемые образцы с нанесенными покрытиями охлаждали на воздухе, и часть из них в дальнейшем подвергали стандартной термической обработке для стали 45 — нагрев + закалка.

Для изучения микроструктуры образцов использовали металлографический оптический микроскоп Neofot-3 при увеличении $\times 360$. Микроструктуру поверхностных слоев исследовали по традиционной технологии на поперечных шлифах. Контроль микротвердости стали по глубине проводили с помощью микротвердомера ПМТ-3 при вдавливании алмазной пирамиды под нагрузкой 0,2, 0,5 и 1,0 Н. Для изучения топографии поверхности, дефектов полученных слоев и микроструктуры образцов использовали растровый электронный микроскоп. Микроструктуру поверхностных слоев исследовали на поперечных шлифах по традиционной технологии. Распределение хрома в нанесенных покрытиях изучали с помощью растрового электронного микроскопа при съемке во вторичных электронах и в характеристическом излучении K_{α} Cr при увеличении $\times 1900$.

В связи с широким применением узлов трения с реверсивным видом движения триботехнические испытания проводили на машине 77МТ-1 с возвратно-поступательным перемещением плоскости по плоскости [3] при средней скорости скольжения

0,1 м/с и давлении 10 МПа. Исследуемые образцы из стали 45 после обработки методом СВС были неподвижными. Через неподвижный образец передавалось давление на нижний образец из стали У10 с большой поверхностью трения, который совершал возвратно-поступательное движение относительно верхнего исследуемого образца из стали 45. Перед испытаниями экспериментальные образцы притирали на плоской шлифовальной плите с применением наждачной бумаги для снятия шихты и окалины. Чистота поверхности не превышала $Ra = 1,25 \pm 0,63$ мкм.

В процессе проведения триботехнических испытаний анализировали убыль массы образцов из стали 45 за определенный период времени (путь трения). Результаты триботехнических испытаний стали 45, обработанной методом СВС с применением различных элементов и СВС + закалка, сравнивали с износостойкостью стали 45, закаленной до твердости 50—54 HRC. Испытания проводили при смазке трущихся поверхностей индустриальным маслом 50. Триботехнические испытания проводили в течение 30 ч без предварительной приработки.

В микроструктуре поверхностной зоны образца из стали 45 после обработки методом СВС на основе шихты, содержащей в качестве основного компонента оксид хрома, не прослеживается четкой разделительной границы между нанесенным покрытием и подложкой. Если исходить из результатов изменения микротвердости по глубине шлифа, то величину покрытия можно оценить в 40—50 мкм. При этом в структуре нанесенного слоя можно рассмотреть разные дефекты, в том числе в виде пор разного размера. Однако после закалки образцов с нанесенным покрытием на основе хрома в микроструктуре явно просматривается четкая разделительная линия — граница между нанесенным покрытием и подложкой. Толщину слоя можно оценить в 10—20 мкм. После термической обработки количество дефектов уменьшается, они носят более упорядоченный характер и их размер в основном уменьшается.

Данные, полученные с помощью растрового электронного микроскопа, в основном подтверждают и уточняют результаты металлографического анализа.

Из результатов, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, видно, что нанесенный слой обеднен хромом ближе к подложке. Его концентрация повышается к поверхности нанесенного покрытия; причем хром находится в виде соединений, возможно карбидов, которые неравномерно распределены как по полю нанесенного слоя, так и по толщине. Представленные результаты однозначно свидетельствуют о том, что доля хрома

в поверхностном слое и толщина поверхностного слоя, содержащего хром, существенно больше непосредственно после обработки методом СВС, чем после дополнительной термической обработки. При обработке методом СВС наибольшая плотность распределения хрома регистрируется в поверхностном слое, который составляет около 10—15 мкм, а толщина слоя, содержащего хром, достигает 40 мкм. Закалка приводит к существенному уменьшению плотности распределения хрома и толщины слоя, содержащего хром (от 5 до 15—20 мкм). Исходя из полученных результатов по распределению хрома в зоне поверхности образца, можно предположить, что процесс диффузии хрома в подложку не происходит, и сам процесс обработки методом СВС можно отнести к процессу нанесения покрытий на поверхность металлов.

Результаты растровой электронной микроскопии при съемке во вторичных электронах показывают, что слой, прилегающий к свободной поверхности, существенно разрыхлен и содержит значительное количество дефектов в виде пор, концентрирующихся в основном на границе раздела слоя, содержащего наибольшую долю хрома, и переходного. Поры имеют различные размеры и форму, заостренные и овальные грани. Из представленных данных видно, что непосредственно после обработки методом СВС размер пор колеблется от 0,2 до 1,5—2,0 мкм. Последующая закалка образцов из стали с покрытием приводит к уменьшению размера пор до 0,1—0,2 мкм и их коагуляции.

Влияние количества пор, их формы и расположения на физико-механические свойства и антифрикционные характеристики рассмотрено в работах [4, 5]. Отмечается, что механизм трения пористых поверхностей является весьма своеобразным. Микропоры, выступающие на поверхности, способствуют увеличению дискретности контакта, уменьшению силы адгезии ювенильных участков, эффектов охватывания и перемещения температурных полей. Кроме того, сообщающиеся поры позволяют более полно использовать эффект самосмазывания при трении в результате заполнения их смазочным материалом.

Результаты исследования микротвердости стали 45 на поперечных шлифах приведены в таблице.

Из приведенных данных видно, что под влиянием технологической обработки по глубине стали формируется структура с существенно различной микротвердостью. При обработке стали методом СВС поверхностный слой (примерно 15 мкм) имеет четкую границу раздела с глубже лежащими слоями микротвердостью $H_{\mu} = 5200$ МПа, которая стремится к значениям микротвердости стали 45 в закаленном

Технология обработки	Микротвердость, МПа		
	Поверхностный слой—покрытие	Переходный слой	Сердцевина
Хром (СВС)	5200	2000	2700—2800
Хром (СВС) + закалка	10 000	3000	6500
Хром + бор (СВС)	7600	2200	2800
Хром + бор (СВС) + закалка	9000	7000	7000

состоянии (6500 МПа). В подповерхностном — переходном — слое толщиной примерно 40—50 мкм, не имеющем четкой границы раздела с матрицей, микротвердость примерно в 2,6 раза (2000 МПа) ниже, чем в поверхностном. Результаты оптической микроскопии протравленного поперечного шлифа указывают, что этот слой практически не содержит перлитной составляющей, присущей среднеуглеродистой стали. С увеличением расстояния от свободной (внешней) поверхности располагается основной металл (матрица) со структурой феррит + перлит и микротвердостью 2700—2800 МПа.

Дополнительная закалка стали 45, обработанной методом СВС, значительно изменяет микротвердость поперечного шлифа по глубине. В поверхностном слое — покрытии — микротвердость порядка 10 000 МПа, т. е. повышается практически в 2 раза по сравнению с предыдущим случаем. Микротвердость переходного слоя увеличивается до 3000 МПа, а в сердцевине — до 6500 МПа (значения, характерного для закаленной стали).

В микроструктуре образцов после обработки методом СВС с использованием шихты на основе соединений хрома и бора наблюдается аналогичная картина.

Результаты растровой электронной микроскопии поперечных шлифов показывают, что при обработке методом СВС в поверхностном слое стали толщиной 10—15 мкм фиксируются каналы — цепочки не сообщающихся между собой пор с заостренными гранями. Каналы расположены в основном перпендикулярно к поверхности. После закалки в поверхностном слое регистрируются множество микротрещин и отдельных разрушенных частиц, между которыми просматриваются инородные включения. Результаты растровой электронной микроскопии указывают на то, что толщина поверхностного слоя после закалки стали составляет 10—15 мкм, что существенно меньше, чем при обработке методом СВС без последующей термической обработки. В соответствии с результатами,

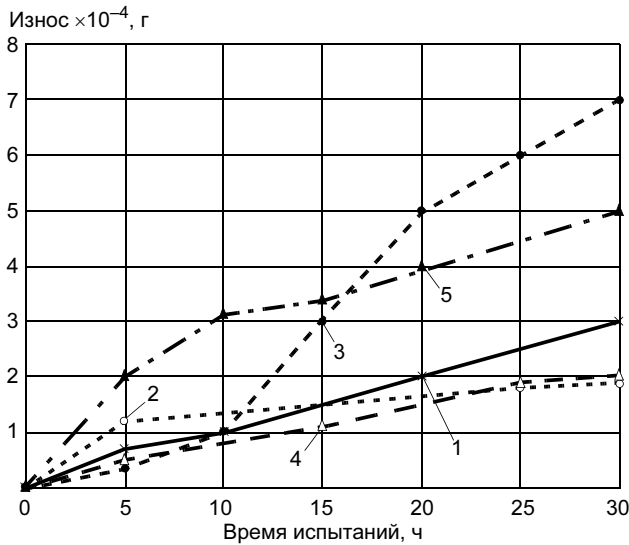
представленными в работе [5], можно полагать, что в процессе нагрева стали под закалку происходит миграция пор к поверхности. При этом поры с заостренными гранями создают большие концентрации напряжений, которые в совокупности с напряжениями, возникающими при закалке, вызывают растрескивание и разрушение поверхностного слоя.

Из результатов, полученных с помощью растрового электронного микроскопа, видно, что после обработки стали методом СВС толщина слоя, содержащего хром, составляет примерно 35—40 мкм. С увеличением расстояния от свободной поверхности плотность хрома постепенно убывает. При последующей закалке толщина слоя, содержащего хром, уменьшается до 10—15 мкм. При этом увеличивается плотность хрома в слое, непосредственно прилегающем к свободной поверхности, и равномерность распределения хрома по слою. Распределение микротвердости по глубине полученного покрытия на основе хрома и бора иллюстрирует таблица. Из представленных результатов следует, что при обработке стали методом СВС и использованием хрома и бора поверхностный слой толщиной 35—40 мкм имеет микротвердость 7600 МПа, а переходной — подповерхностный — толщиной 50—60 мкм — 2200 МПа. В объеме материала зафиксирована микротвердость 2800 МПа.

Закалка стали, обработанной методом СВС, приводит к уменьшению толщины поверхностного слоя до 10—15 мкм и увеличению микротвердости до 9000 МПа. Микротвердость в переходном — подповерхностном — слое и сердцевине материала одинакова 7000 МПа и в 2,5 раза выше, чем в незакаленном образце.

При закалке в поверхностном слое стали зафиксирована новая структурная составляющая, предположительно являющаяся результатом насыщения поверхностных слоев элементами окружающей среды или окалинообразования. По глубине образцов, обработанных методом СВС в сочетании с закалкой, формируется структура, состоящая из существенно упрочненного поверхностного слоя толщиной 10—15 мкм с твердостью 9000 МПа.

Результаты исследований на износостойкость образцов с нанесенными методом СВС покрытиями на основе хрома и бора с последующей термической обработкой (ТО) и без нее приведены на рисунке. Видно, что наилучшие результаты по износу имеет сталь, обработанная СВС с использованием хрома и хрома и бора (кривые 2, 4). Следует отметить, что общий уровень износа стали 45 как в состоянии закалки, так и после обработки методом СВС с использованием хрома и хрома и бора весьма низок.



Изменение износа во времени: 1 — сталь 45 + ТО; 2 — сталь 45 + СВС (Cr); 3 — сталь 45 + СВС (Cr) + ТО; 4 — сталь 45 + СВС (Cr + В); 5 — сталь 45 + СВС (Cr + В) + ТО

Интенсивность изнашивания стали в закаленном состоянии при трении в паре со сталью У10 в среде индустриального масла 50 при данных условиях эксплуатации $J_h = 1,35 \cdot 10^{-10}$. При этом (см. рисунок, кривая 1) можно говорить о линейном характере износа стали с постоянной скоростью на анализируемом пути трения (времени испытания).

Для образцов, обработанных методом СВС, с увеличением пути трения выявляется замедление скорости износа по сравнению с закаленной сталью (см. рисунок, кривые 2, 4). Интенсивность изнашивания в установленном режиме трения для образцов, обработанных СВС с использованием хрома и хрома и бора $J_h = 10$. Скорость износа и интенсивность изнашивания возрастают, если образец после обработки СВС дополнительно закален (см. рисунок, кривые 3, 5). Интенсивность изнашивания увеличивается до $3,2 \cdot 10^{-10}$ (см. рисунок, кривая 3) и до $2,7 \cdot 10^{-10}$ (см. рисунок, кривая 5).

ВЫВОДЫ

1. Обработка стали 45 методом самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) за счет изменения состава шихты позволяет получить поверхностное покрытие толщиной 40—50 мкм. Твердость таких покрытий на основе хрома составляет 5200 МПа, на основе композиции хром + бор — 7600 МПа.

2. В соответствии с полученными результатами по распределению хрома рассматриваемые в работе режимы обработки методом СВС целесообразно отнести к технологии нанесения покрытий на металл, так как существенной диффузии в подложку не наблюдается.

3. Последующая термическая обработка образцов с нанесенным покрытием на основе хрома и композиции хром + бор приводит к уменьшению толщины покрытия до 10—20 мкм, изменению распределения хрома по площади и толщине покрытия; уменьшению размера пор с 1,5—2,0 до 0,2 мкм и их коагуляции; увеличению твердости покрытия до 10 000 МПа на основе хрома и до 9000 МПа на основе композиции хром + бор.

4. Методом СВС можно повысить износостойкость металлической поверхности за счет нанесения покрытия, содержащего хром и композицию хром + бор.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левашов Е. А., Рогачев А. С., Юхвин В. И. Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. М.: Бином, 1999. 176 с.
2. Евтушенко А. Т., Пазарэ С., Торбунов С. С. Самораспространяющийся высокотемпературный синтез инструментальной стали // МИТОМ. 2007. № 4. С. 43—46.
3. Гаркунов Д. Н., Крагельский И. В., Поляков А. А. Избирательный перенос в узлах трения. М.: Транспорт, 1969. 104 с.
4. Удовицкий В. И. Антифрикционное пористое силицирование углеродистых сталей. М.: Машиностроение, 1971. 240 с.
5. Удовицкий В. И. Долговечность диффузионно-насыщенных кремнием деталей машин. М.: Машиностроение, 1983. 240 с.

П. Н. СИЛЬЧЕНКО, д-р техн. наук, А. В. КОЛОТОВ, канд. техн. наук,
М. А. МЕРКО, канд. техн. наук
ФГОУ ВПО "Сибирский федеральный университет"

Анализ влияния параметров зубчатых колес для достижения необходимых качественных показателей связанных зубчатых передач

В работах [1—3] предложена методология построения объемных блокирующих контуров для достижения заданного значения коэффициента перекрытия зубчатых передач с зацеплением двух и более колес. В данной работе развивается предложенная методология и определяются значения не только коэффициента перекрытия, но и других показателей, таких как толщина зуба s_a на окружности вершин и минимальный подрез зубьев колес для обеспечения необходимых показателей зубчатых передач.

Объемный блокирующий контур строится [1] в глобальной системе координат X_1, X_2 и X_3 проецированием характерных кривых плоских блокирующих контуров, полученных в системах координат с осями, соответствующими коэффициентам относительного смещения $x_{1v}x_{3v}, x_{2w}x_{3w}$ и $x_{1h}x_{2h}$ (рис. 1, а) для зацеплений колес с числами зубьев z_1, z_2 и z_3 до пересечения друг с другом. Формирование объемного блокирующего контура в глобальной системе координат X_1, X_2 и X_3 обеспечивается совокупностью поверхностей, образованных линиями плоских блокирующих контуров соответствующих пар зубчатых колес.

Для решения подобной задачи на основе предлагаемой теории [1, 2] создан пакет прикладных программ, позволяющий проводить выбор коэффициентов относительного смещения зубчатых колес зубчатых механизмов для заданных условий или критериев. На основе полученных результатов рассчитаны геометрические параметры зубчатых передач и их колес, а также выполнен анализ их влияния на качественные показатели механизма в целом.

Проиллюстрируем разработанную методику на примере рядного механизма с тремя зубчатыми колесами внешнего зацепления $z_1 = 16, z_2 = 40$ и $z_3 = 62$ (изготовление реечным инструментом при угле профиля $\alpha = 20^\circ$, высоте головки исходного профиля $h_a = 1$ и радиальном зазоре $c = 0,25$).

Объемный блокирующий контур для этих зубчатых колес состоит из поверхностей 1—6 (рис. 1, б), образованных совокупностью координат точек, определяющих положение линий интерференции зубьев на "плоских" блокирующих контурах, построенных на осях по коэффициентам смещения $x_{1v}x_{3v}, x_{2w}x_{3w}$ и $x_{1h}x_{2h}$ для зацеплений колес с числами зубьев z_1, z_2 и z_3 соответственно.

На рис. 2 и 3 приведены объемные блокирующие контуры, построенные для рассматриваемого механизма с учетом значений коэффициента тор-

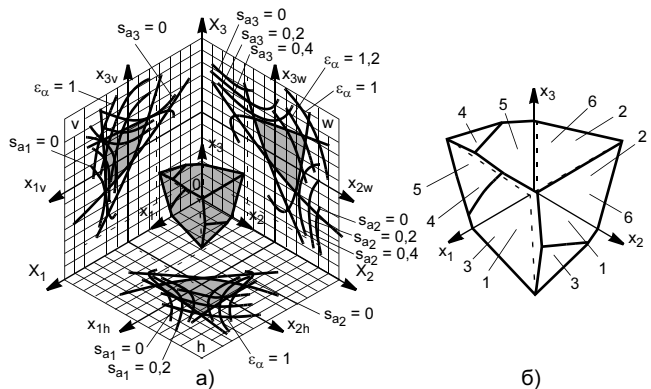


Рис. 1. Объемный блокирующий контур, образованный поверхностями интерференции для колеса z_1 в зацеплении колес z_1, z_3 (1) и z_1, z_2 (5), колеса z_2 в зацеплении колес z_2, z_3 (3) и z_1, z_2 (6), колеса z_3 в зацеплении колес z_1, z_3 (2) и z_2, z_3 (4): а — глобальная система координат; б — собственная

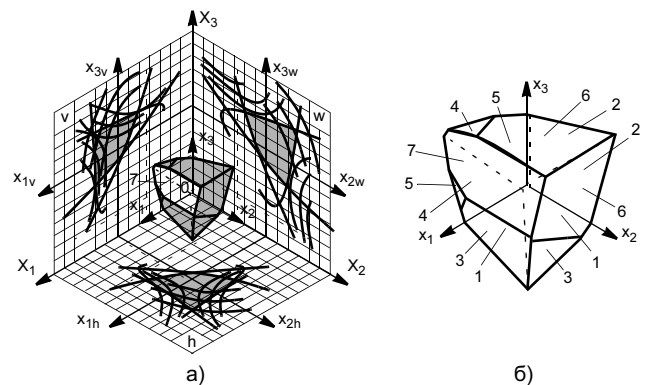


Рис. 2. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 7 при $\epsilon_\alpha = 1,2$ в зацеплении колес $z_1—z_3$: а, б — см. рис. 1

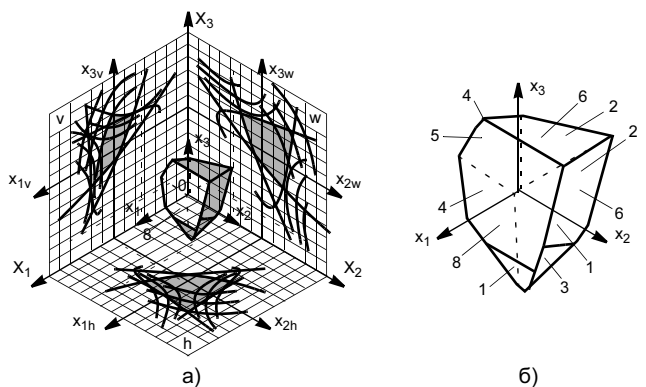


Рис. 3. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 8 при $\epsilon_\alpha = 1,4$ в зацеплении колес $z_1—z_3$: а, б — см. рис. 1

цевого перекрытия для зацепления колес $z_1—z_3$. Координаты точек, образующих поверхности 7 (см. рис. 2, а) и 8 (см. рис. 3, а), определяют значение коэффициента торцевого перекрытия в зацеплении колес $z_1—z_3$, что приводит к ограничению области совместного выбора коэффициентов относительного смещения для зацепления колес в зависимости от значения ε_α (см. рис. 1, а). Значения коэффициента торцевого перекрытия для зацепления зубчатых колес $z_1—z_3$ будут определяться на объемном блокирующем контуре координатами точек поверхности 7 — при $\varepsilon_\alpha = 1,2$ (см. рис. 2, б) и поверхности 8 — при $\varepsilon_\alpha = 1,4$ (см. рис. 3, б).

Поверхность коэффициента торцевого перекрытия в зацеплении колес $z_1—z_3$ при $\varepsilon_\alpha = 1$ (см. рис. 1, а) лежит за пределами объемного блокирующего контура, вследствие чего не влияет на формирование поверхностей объемной фигуры рассматриваемого механизма.

Анализируя расположение проекций объемного блокирующего контура на локальных координатных плоскостях, можно определить значения соответствующих коэффициентов, которые формируют область совместного существования их значений (см. рис. 1, а), удовлетворяющих оптимальному зацеплению колес $z_1—z_2—z_3$.

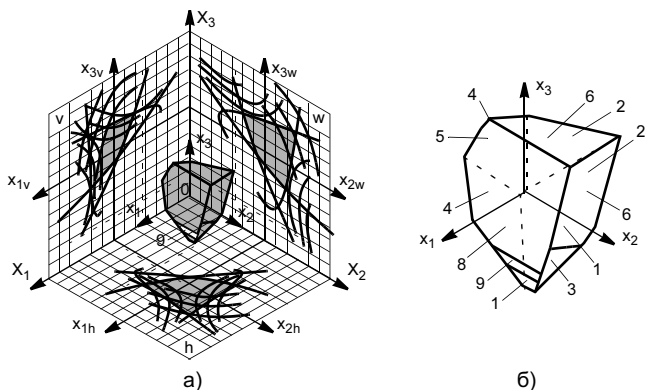


Рис. 4. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 9 при $s_{a_1} = 0,2$ в зацеплении колес $z_1—z_3$: а, б — см. рис. 1

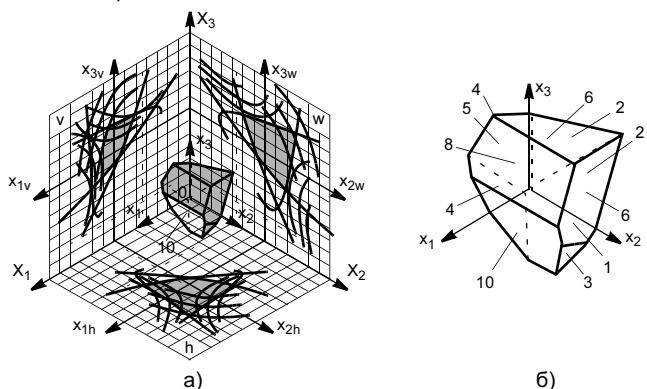


Рис. 5. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 10 при $s_{a_1} = 0,4$ в зацеплении колес $z_1—z_3$: а, б — см. рис. 1

На рис. 4 и 5 приведены объемные блокирующие контуры, построенные для рассматриваемого механизма с учетом значений толщины зуба s_a на поверхности вершин колеса z_1 в зацеплении колес $z_1—z_3$. Координаты точек, образующих поверхности 9 (см. рис. 4, а) и 10 (см. рис. 5, а), определяют значение толщины зуба s_a на поверхности вершин колеса z_1 в зацеплении колес $z_1—z_3$, что приводит к ограничению области совместного выбора коэффициентов относительного смещения для зацепления колес 1—3 в зависимости от s_a (см. рис. 1, а). Значения толщины зуба на поверхности вершин колеса для зацепления зубчатых колес $z_1—z_3$ будут определяться на объемном блокирующем контуре координатами точек поверхности 9 — при $s_{a_1} = 0,2$ (см. рис. 4, б) и поверхности 10 — при $s_{a_1} = 0,4$ (см. рис. 5, б). По расположению проекции блокирующего контура в зацеплении колес $z_1—z_3$ установили, что линия толщины зуба z_1 на окружности вершин при значении 0 (см. рис. 1, а) лежит за пределами объемного блокирующего контура, вследствие чего она не влияет на формирование поверхностей объемного блокирующего контура рассматриваемого механизма.

На рис. 6 и 7 приведены объемные блокирующие контуры, построенные для рассматриваемого ме-

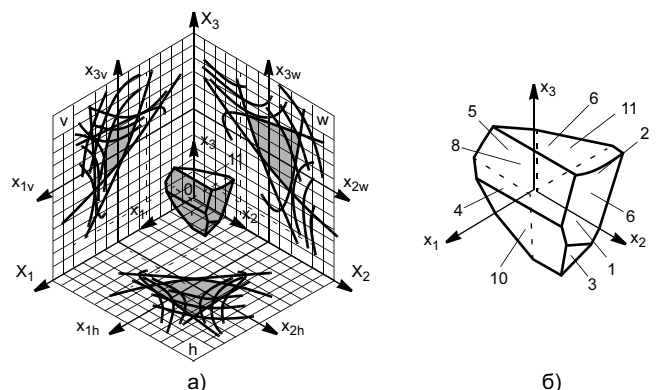


Рис. 6. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 11 при $s_{a_3} = 0,2$ в зацеплении колес $z_1—z_3$: а, б — см. рис. 1

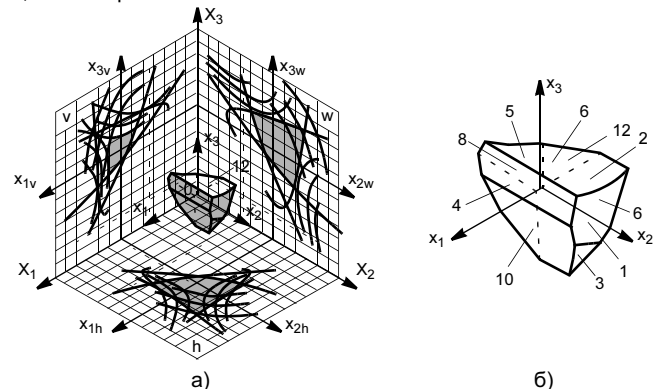


Рис. 7. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 12 при $s_{a_3} = 0,4$ в зацеплении колес $z_1—z_3$: а, б — см. рис. 1

ханизма с учетом значений толщины зуба s_a на поверхности вершин колеса z_3 в зацеплении колес $z_1—z_3$. Координаты точек, образующих поверхности 11 (см. рис. 6, а) и 12 (см. рис. 7, а), определяют значение толщины зуба s_a на поверхности вершин колеса z_3 в зацеплении колес $z_1—z_3$, что приводит к ограничению области совместного выбора коэффициентов относительного смещения для зацепления колес 1—3 в зависимости от значения s_a (см. рис. 1, а). Толщина зуба на поверхности вершин колеса для

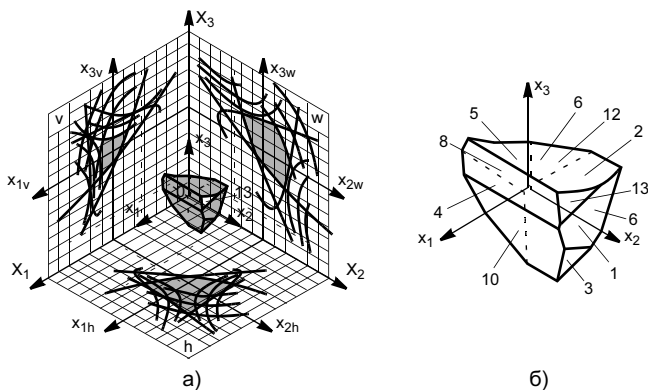


Рис. 8. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 13 при $\varepsilon_\alpha = 1,4$ в зацеплении колес $z_2—z_3$: а, б — см. рис. 1

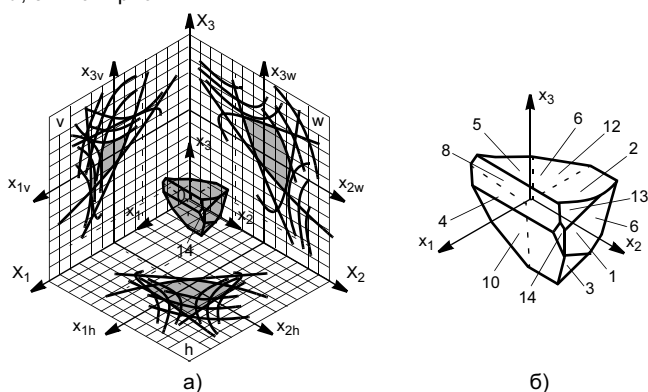


Рис. 9. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 14 при $\varepsilon_\alpha = 1,2$ в зацеплении колес $z_1—z_2$: а, б — см. рис. 1

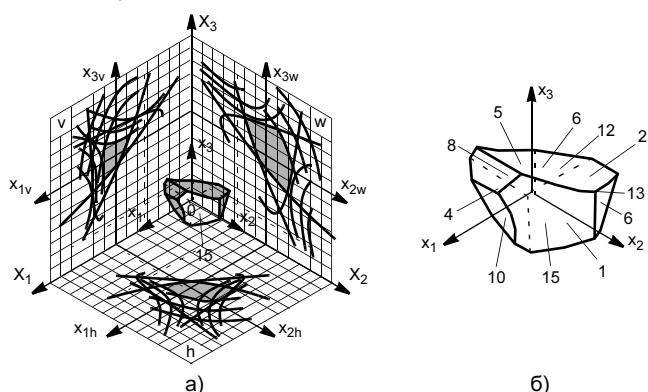


Рис. 10. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 15 при $\varepsilon_\alpha = 1,4$ в зацеплении колес $z_1—z_2$: а, б — см. рис. 1

зацепления зубчатых колес $z_1—z_2$ будет определяться по объемному блокирующему контуру координатами точек поверхности 11 — при $s_{a_3} = 0,2$ (см. рис. 6, б) и поверхности 12 — при $s_{a_3} = 0,4$ (см. рис. 7, б).

Анализируя расположение проекции блокирующего контура в зацеплении колес $z_1—z_3$, установили, что линия толщины зуба z_3 на окружности вершин при значении 0 (см. рис. 1, а) находится за пределами объемного блокирующего контура, вследствие чего не влияет на формирование поверхностей объемного блокирующего контура рассматриваемого механизма.

На рис. 8 приведен объемный блокирующий контур, построенный с учетом значений коэффициента торцевого перекрытия для зацепления колес $z_2—z_3$. Координаты точек, образующих поверхность 13 (см. рис. 8, а), определяют значение коэффициента торцевого перекрытия в зацеплении колес 1—3 в зависимости от значения ε_α (см. рис. 1, а). Значение коэффициента торцевого перекрытия для зацепления зубчатых колес $z_2—z_3$ будет определяться на объемном блокирующем контуре координатами точек поверхности 13 — при $\varepsilon_\alpha = 1,4$ (см. рис. 8, б).

Поверхности коэффициента торцевого перекрытия в зацеплении колес $z_2—z_3$ при ε_α , равном 1 и 1,2 (см. рис. 1, а), находятся за пределами объемного блокирующего контура, вследствие чего не влияют на формирование поверхностей объемного блокирующего контура рассматриваемого механизма.

Анализируя расположение проекции блокирующего контура в зацеплении колес $z_2—z_3$ (X_{2w}, X_{3w}), установили, что линии толщины зуба на окружности вершин при s_a , равной 0, 0,2 и 0,4 мм, колес z_2 и z_3 (см. рис. 1, а) лежат за пределами объемного блокирующего контура, вследствие чего не влияют на формирование поверхностей объемного блокирующего контура рассматриваемого механизма.

На рис. 9 и 10 приведены объемные блокирующие контуры, построенные с учетом значений коэффициента торцевого перекрытия для зацепления колес $z_1—z_2$. Координаты точек, образующих поверхности 14 (см. рис. 9, а) и 15 (см. рис. 10, а), определяют значения коэффициентов торцевого перекрытия в зацеплении колес $z_1—z_2$, что приводит к ограничению области совместного выбора коэффициентов относительного смещения для зацепления колес 1—3, в зависимости от ε_α (см. рис. 1, а). Значения коэффициентов торцевого перекрытия для зацепления зубчатых колес $z_1—z_2$ будут определяться на объемном блокирующем контуре координатами точек поверхности 14 — при $\varepsilon_\alpha = 1,2$ (см. рис. 9, б) и поверхности 15 — при $\varepsilon_\alpha = 1,4$ (см. рис. 10, б).

Поверхность коэффициента торцевого перекрытия в зацеплении колес $z_1—z_2$ при $\varepsilon_\alpha = 1$ (см. рис. 1, а) находится за пределами объемного блокирующего

контура, вследствие чего не влияет на формирование поверхностей объемного блокирующего контура рассматриваемого механизма.

На рис. 11 приведен объемный блокирующий контур, построенный с учетом значений толщины зуба s_a на поверхности вершин колеса z_1 в зацеплении колес $z_1—z_3$. Координаты точек, образующих поверхность 16 (см. рис. 11, а), определяют значение толщины зуба s_a на поверхности вершин колеса z_1 в зацеплении колес $z_1—z_3$, что приводит к ограничению области совместного выбора коэффициентов относительного смещения для зацепления колес 1—3 в зависимости от значения s_a (см. рис. 1, а). Значения толщины зуба на поверхности вершин колеса для зацепления зубчатых колес $z_1—z_3$ будут определяться на объемном блокирующем контуре координатами точек поверхности 16 — при $s_{a1} = 0,4$ (см. рис. 11, б).

Анализируя расположение проекции блокирующего контура в зацеплении колес $z_1—z_3$, установили, что линии толщины зуба z_1 на окружности вершин при значениях s_a , равной 0 и 0,2 мм (см. рис. 1, а), находятся за пределами объемного блокирующего контура, вследствие чего не влияют на формирование поверхностей объемного блокирующего контура рассматриваемого механизма.

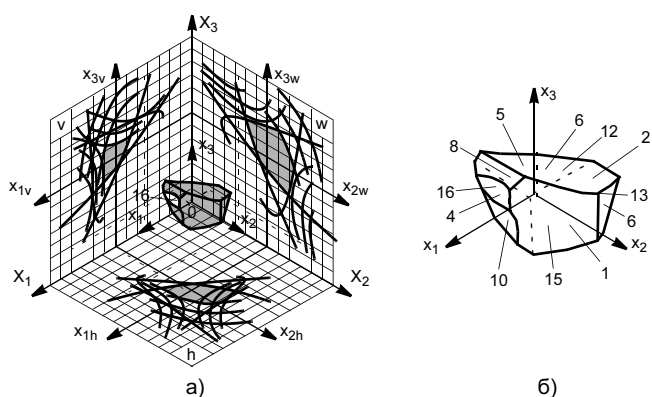


Рис. 11. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 16 при $s_{a1} = 0,4$ в зацеплении колес $z_1—z_2$: а, б — см. рис. 1

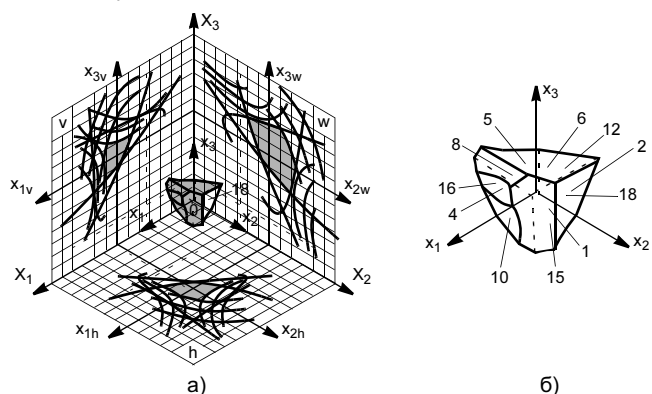


Рис. 13. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 18 при $s_{a2} = 0,4$ в зацеплении колес $z_1—z_2$: а, б — см. рис. 1

На рис. 12 и 13 приведены объемные блокирующие контуры, построенные с учетом значений толщины зуба s_a на поверхности вершин колеса z_2 в зацеплении колес $z_1—z_2$. Координаты точек, образующих поверхность 17 (см. рис. 12, а) и 18 (см. рис. 13, а), определяют значение s_a на поверхности вершин зубьев колеса z_2 в зацеплении колес $z_1—z_2$, что приводит к ограничению области совместного выбора коэффициентов относительного смещения для зацепления колес 1—3 в зависимости от значения s_a (см. рис. 1, а). Значения толщины зуба на поверхности вершин колеса для зацепления зубчатых колес $z_1—z_2$ будут определяться на объемном блокирующем контуре координатами точек поверхности 17 — при $s_{a2} = 0,2$ мм (см. рис. 12, б) и поверхности 18 — при $s_{a2} = 0,4$ мм (см. рис. 13, б).

Анализируя расположение проекции блокирующего контура в зацеплении колес $z_1—z_2$, установили, что линия толщины зуба z_2 на окружности вершин при значении 0 (см. рис. 1, а) находится за пределами объемного блокирующего контура, вследствие чего не влияет на формирование поверхностей объемного блокирующего контура рассматриваемого механизма.

На рис. 14 приведен объемный блокирующий контур, построенный с учетом значений линии ог-

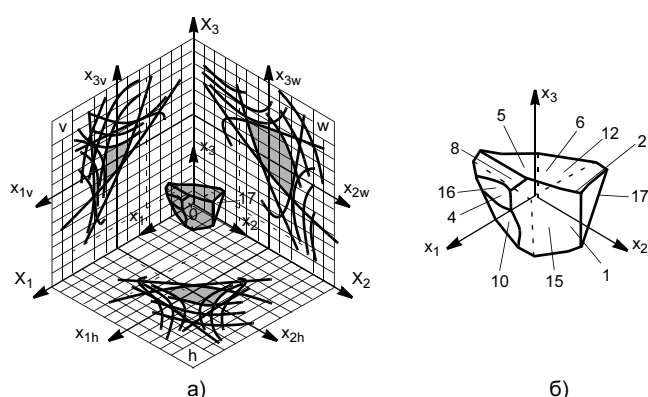


Рис. 12. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 17 при $s_{a2} = 0,2$ в зацеплении колес $z_1—z_2$: а, б — см. рис. 1

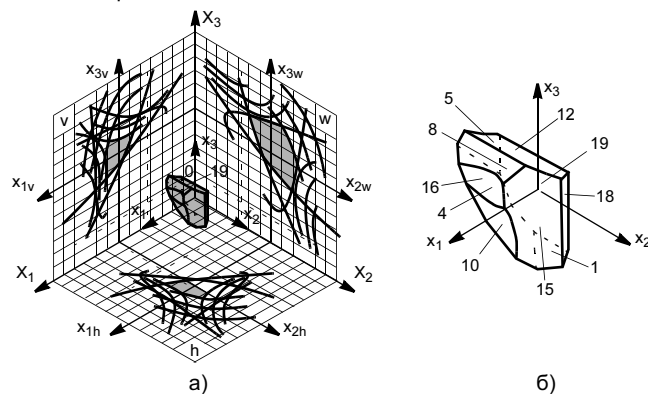


Рис. 14. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 19 при $x_1 = x_{1min}$ в зацеплениях колес $z_1—z_3$ и $z_1—z_2$: а, б — см. рис. 1

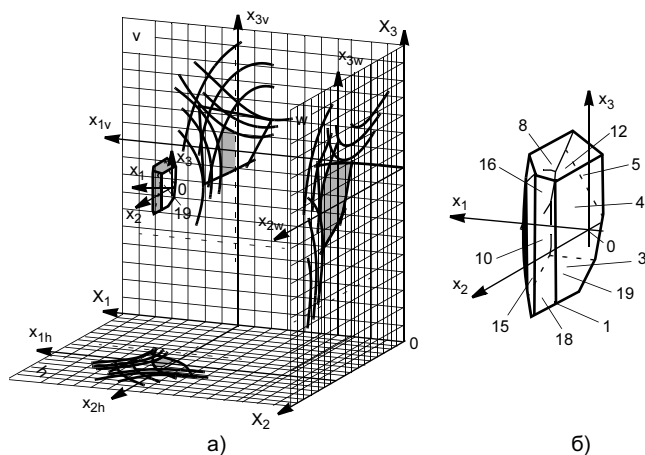


Рис. 15. Объемный блокирующий контур с учетом влияния поверхности 19 при $x_1 = x_{1min}$ в зацеплениях колес $z_1—z_3$ и $z_1—z_2$: а, б — см. рис. 1

раничения по подрезанию зубьев в зацеплении колес $z_1—z_3$ и $z_1—z_2$. Координаты точек, образующих поверхность 19 (см. рис. 14, а, б), определяют значение ограничения по подрезанию зубьев колеса z_1 в зацеплениях колес $z_1—z_3$ и $z_1—z_2$, что приводит к ограничению области совместного выбора коэффициентов относительного смещения для зацепления колес 1—3 в зависимости от значения $x_1 = x_{1min}$ (см. рис. 1, а).

Анализируя рисунок 14, а, установили, что поверхность 19 объемного блокирующего контура характеризует влияние ограничения по минимальному подрезанию зубьев колеса z_1 в зацеплениях колес $z_1—z_3$ и $z_1—z_2$ на объемную фигуру.

Для большей наглядности расположения объемного блокирующего контура в глобальной системе координат произведем поворот данной системы ко-

ординат совместно с рассматриваемой объемной фигурой (рис. 15, а, б). Видно, что точка начала отсчета системы координат x_1, x_2, x_3 объемного блокирующего контура смещена относительно точки начала отсчета глобальной системы координат, X_1, X_2, X_3 , а координаты объемной фигуры соответствуют возможным значениям коэффициентов относительного смещения для зубчатых колес $z_1—z_2—z_3$ и находятся в областях их рационального сочетания.

ВЫВОД

Метод построения объемных блокирующих контуров, основанный на учете областей существования всех геометрических параметров каждого зубчатого колеса, позволяет определить зоны совместных решений, исключить из дальнейшего анализа данные, не удовлетворяющие заданным условиям, и упростить поиск требуемого решения для достижения необходимых качественных показателей. Показана возможность обеспечения требуемых значений не только коэффициента перекрытия, но и других показателей, таких как толщины зуба на окружности вершин и минимального подреза зубьев связанных колес.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Сильченко П. Н., Колотов А. В., Мерко М. А. Построение объемных блокирующих контуров при расчете зубчатых передач с зацеплением двух и более колес для обеспечения всех требуемых эксплуатационных показателей // Технология машиностроения. 2006. № 9. С. 57—60.
2. К расчету зубчатых механизмов при одновременном зацеплении двух и более колес / П. Н. Сильченко, А. В. Колотов, М. А. Мерко, Д. А. Швеца // Инновационное развитие регионов Сибири / Под ред. С. А. Подлесного. Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. Ч. 2. С. 438—442.
3. Методика определения коэффициентов относительного смещения для обеспечения требуемых качественных показателей зубчатых механизмов / П. Н. Сильченко, А. В. Колотов, М. А. Мерко, Д. А. Швеца // Проблемы механики современных машин. Улан-Удэ: ВСГТУ, 2006. С. 132—135.

Е. Ф. КАПИНОС, канд. техн. наук, Ю. М. МИРОШ, д-р техн. наук (ГКНПЦ им. М. В. Хруничева), Т. С. СУХОВА, аспирант ("МАТИ" — РГТУ им. К. Э. Циолковского)

Обеспечение качества измерительных комплексов аэрокосмических объектов

Измерительные комплексы аэрокосмических объектов (ИК АКО) служат для получения информации о состоянии (значениях измеряемых параметров систем, агрегатов, конструкции и других элементов) АКО при испытаниях или эксплуатации.

В настоящее время отсутствует единая методика, реализующая принципы системного подхода к обеспечению качества ИК АКО как при их разработке, так и модернизации.

ИК АКО включают бортовой и наземный сегменты, а в отдельных случаях и связующий их сегмент, ретрансляции сигналов. Основными элементами бортового сегмента ИК, как правило, являются бортовые радиотелеметрические системы (БРТМС), которые включают датчики, телеметрические согласующие устройства, формователи группового телеметрического сигнала (основные и локальные коммутаторы), радиопередающие устройства (РПДУ), пе-

редающие антенно-фидерные устройства (АФУ), запоминающие устройства (ЗУ) и кольцевые запоминающие устройства (КЗУ) и др.

Основными элементами наземного сегмента ИК, как правило, являются приемные АФУ и приемно-регистрирующие станции (ПРС), размещаемые на измерительных пунктах, а также средства обработки телеметрической информации (ТМИ), зарегистрированной ПРС. Средства обработки могут размещаться на измерительных пунктах, в непосредственной близости от ПРС и (или) в центрах сбора и обработки (ЦСО) ТМИ, либо информационно-вычислительных центрах (ИВЦ), координационно-вычислительных центрах (КВЦ), центрах управления полетом (ЦУП) и других местах (далее — ЦСО). При этом, если средства обработки ТМИ удалены от ПРС, то они подключаются к ПРС каналами сбора ТМИ, построенными на базе наземных (кабельных или релейных) или космических (спутниковых) линий связи.

В наземном сегменте ИК выделяют подсистему приема-регистрации ТМИ (приемные АФУ и ПРС) и подсистемы сбора и обработки ТМИ (каналы сбора ТМИ между ПРС и средствами обработки, а также средства обработки). Совокупность приведенных подсистем называется комплексом средств измерений, сбора и обработки (КСИСО) ТМИ.

Основными элементами сегмента ретрансляции сигналов, как правило, являются бортовая ретрансляторная система (каналообразующее устройство, подключенное входами к выходам формирователей группового телеметрического сигнала БРТМС, РПДУ и передающее АФУ), размещенная на АКО; ретранслятор (приемное АФУ, радиоприемное устройство (РПМУ), РПДУ и передающее АФУ), размещенные на других, внешних для АКО, объектах, например на спутниках-ретрансляторах; наземная ретрансляторная система (приемное АФУ, РПМУ и каналообразующее устройство, выходы которого соединены с входами ПРС), размещенная на измерительных пунктах либо непосредственно в ЦСО.

Совокупность бортового сегмента ИК и подсистемы приема-регистрации ТМИ наземного сегмента ИК, а при наличии и связующего их сегмента ретрансляции сигналов, образуют подсистему проведения телеметрических измерений ИК.

Главная цель применения ИК (задача подсистемы проведения телеметрических измерений) — регистрация ТМИ о состоянии АКО в процессе его испытаний и эксплуатации. При этом регистрация ТМИ должна быть проведена на интервале ответственности ИК

$$T = T_0; T \in T_0, \quad (1)$$

где T — интервал времени успешной регистрации ТМИ ИК, равный $T(P, I, t, Q, C)$ (P — достоверность ТМИ, зарегистрированной ИК; I — суммарная информативность БРТМС АКО; t — срок проведения телеметрических измерений ИК; Q — надежность под-

системы проведения телеметрических измерений ИК; C — ресурсы, необходимые для реализации подсистемы проведения телеметрических измерений ИК); T_0 — интервал времени ответственности ИК.

Зарегистрированная ТМИ должна иметь достоверность не ниже требуемой

$$P \leq P_0, \quad (2)$$

где P — достоверность ТМИ, зарегистрированной ИК; P_0 — требуемая достоверность ТМИ.

На практике главная цель применения ИК достигается не всегда. В связи с этим возникает необходимость определения степени соответствия полученного ИК реального результата телеметрических измерений требуемому результату (для достижения которого он используется), а также оценки вариантов построения ИК для проведения данной операции по степени предпочтительности. Исходя из этого, вводим [1, 2] и выбираем [3, 4] показатель эффективности проведения измерительным комплексом телеметрических измерений

$$W = \frac{T}{T_0}. \quad (3)$$

Здесь T — интервал времени успешной регистрации ТМИ ИК, равный $\sum_k T_k$; T_k — частный интервал времени успешной регистрации ТМИ в интервале ответственности ИК, равный $p_k T_k$;

$$p_k = \begin{cases} 1, & \text{если } P_k \leq P_0; \\ 0, & \text{если } P_k > P_0, \end{cases}$$

где P_k — достоверность ТМИ, зарегистрированной ИК на интервале времени T_k ($T_k \in T_0$ — частный интервал времени ответственности ИК).

Исходя из выбранного показателя (3) эффективности проведения ИК телеметрических измерений, цель проектирования подсистемы проведения телеметрических измерений ИК заключается в обеспечении максимального значения этого показателя, т. е.:

$$W_{\text{пр}} \rightarrow \max W(T_{\text{пр}}, T_0); \quad \begin{aligned} &P_{\text{пр}} \leq P_0; \\ &I_{\text{пр}} \geq I_0; \\ &t_{\text{пр}} \leq t_0; \\ &Q_{\text{пр}} \geq Q_0; \\ &C_{\text{пр}} \leq C_0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $W_{\text{пр}}$ — показатель эффективности проведения телеметрических измерений спроектированным ИК; $T_{\text{пр}}$ — интервал времени успешной регистрации ТМИ спроектированным ИК, равный $T(P_{\text{пр}}, I_{\text{пр}}, t_{\text{пр}}, Q_{\text{пр}}, C_{\text{пр}})$; $P_{\text{пр}}$ — достоверность ТМИ, зарегистрированной спроектированным ИК; $I_{\text{пр}}$ — суммарная информативность БРТМС АКО в спроектированном ИК; $t_{\text{пр}}$ — срок проведения телеметрических измерений спроектированным ИК; $Q_{\text{пр}}$ — надежность подсистемы проведения телеметрических из-

мерений спроектированного ИК; $C_{пр}$ — ресурсы, необходимые для реализации подсистемы проведения телеметрических измерений спроектированного ИК; T_0 — требуемый интервал времени ответственности ИК; P_0 — требуемая достоверность ТМИ; I_0 — информативность АКО, как объекта контроля; t_0 — допустимый срок проведения телеметрических измерений ИК; Q_0 — требуемая надежность подсистемы проведения телеметрических измерений ИК; C_0 — ресурсы, установленные для реализации подсистемы проведения телеметрических измерений ИК.

Для достижения поставленной цели предлагаются следующие подходы к обеспечению качества характеристик ИК АКО.

1. *Выбор типа, числа и мест установки БРТМС на АКО.* Исходя из назначенного перечня телеметрируемых параметров АКО, производят выбор типа, числа и мест установки БРТМС на фрагментах АКО (ступени ракеты-носителя, разгонном блоке, головном обтекателе, космическом аппарате). Количество БРТМС определяется общей информативностью АКО (как объекта контроля) и информативностью используемых БРТМС. При этом состав БРТМС в части, касающейся РПДУ, АФУ, ЗУ и КЗУ, а также места размещения АФУ на фрагментах АКО, уточняются в последующем.

2. *Выбор числа и мест расположения измерительных пунктов наземного сегмента ИК.* В основу выбора числа и мест расположения измерительных пунктов наземного сегмента ИК положены результаты анализа траектории полета АКО (полетное время, географические координаты проекции центра тяжести АКО на поверхность Земли и высота центра тяжести АКО над поверхностью Земли как функции полетного времени) и вычленения в траектории полета АКО участков, соответствующих интервалам времени ответственности ИК. С использованием указанных результатов определяют возможность использования существующих измерительных пунктов ИК различных АКО и места расположения новых дополнительных измерительных пунктов на поверхности Земли. Последние определяют из условия, чтобы в совокупности обеспечивались зоны видимости полета АКО на всем интервале ответственности ИК при положительных углах места наблюдения АКО (обычно от 7 до 80°).

Выбранный состав измерительных пунктов наземного сегмента ИК уточняют в дальнейшем.

3. *Определение числа АФУ и ПРС на измерительных пунктах.* Исходя из типа, количества, мест установки БРТМС на фрагментах АКО и моментов времени отделения фрагментов от АКО, предусмотренных циклограммой полета АКО, а также зон видимости полета АКО измерительными пунктами, определяют типы и количество приемных АФУ и ПРС на них. Выбранное количество АФУ и ПРС на измерительных пунктах уточняется в дальнейшем.

4. *Определение необходимости сегмента ретрансляции сигналов в составе ИК.* Сегмент ретрансляции сигналов в составе ИК рассматривают как альтернативу измерительным пунктам, когда создание требуемых стационарных измерительных пунктов на поверхности Земли или создание и использование вместо них подвижных измерительных пунктов невозможно, в том числе и по экономическим соображениям.

При этом принимают во внимание допустимый срок проведения телеметрических измерений ИК АКО, т. е. допустимую задержку с момента измерения контролируемых параметров на АКО и до момента приема-регистрации результатов указанных измерений ПРС измерительными пунктами. Если допустимый срок проведения телеметрических измерений соизмерим со временем невидимости АКО стационарными измерительными пунктами, тогда вместо введения в состав ИК сегмента ретрансляции сигналов в состав соответствующих БРТМС АКО могут быть введены ЗУ. Последние должны обеспечить запись результатов измерения контролируемых параметров при полете АКО в зоне невидимости его стационарными измерительными пунктами и воспроизведения записанных результатов измерений при последующем входе АКО в зону видимости стационарных измерительных пунктов.

5. *Определение мест размещения АФУ БРТМС на фрагментах АКО.* Места размещения АФУ БРТМС на фрагментах АКО определяют исходя из требования, чтобы при прохождении (пролете) АКО зон видимости измерительных пунктов максимумы основных "лепестков" диаграммы направленности АФУ БРТМС были сориентированы в направлении соответствующих измерительных пунктов наземного сегмента ИК или ретрансляторов сегмента ретрансляции сигналов. Указанное требование, как правило, является очень сложным для реализации и на практике для его достижения используют специальные приемы, в том числе устанавливают несколько АФУ, сфазированные таким образом, чтобы обеспечить всенаправленность радиоизлучения; либо устанавливают несколько АФУ, которые затем переключаются в соответствии с полетной циклограммой; либо используют АФУ типа ФАР с управлением диаграммой направленности в соответствии с полетной циклограммой. После определения мест размещения АФУ на фрагментах АКО для интервалов времени ответственности ИК рассчитывают для каждой БРТМС объемные диаграммы направленности либо минимальные коэффициенты усиления АФУ.

6. *Определение достоверности ТМИ, зарегистрированной ПРС измерительных пунктов.* Достоверность ТМИ, зарегистрированной ПРС измерительных пунктов, определяют расчетным путем, используя следующие данные: расчетную полную траекторию полета АКО; циклограмму полета АКО;

интервалы времени ответственности ИК; географические координаты установки приемных АФУ измерительных пунктов; диаграммы направленности или минимальные коэффициенты усиления приемных АФУ измерительных пунктов и передающих АФУ каждой БРТМС; мощность и вид модуляции сигналов РГДУ каждой БРТМС; чувствительность приемников ПРС; распределение (план радиосвязи) АФУ и ПРС измерительных пунктов по АФУ и РГДУ БРТМС АКО; помеховую обстановку в районах дислокации измерительных пунктов; секторы закрытия зон видимости приемных АФУ измерительных пунктов.

После определения достоверности ТМИ, зарегистрированной ПРС измерительных пунктов, оценивают интервал T времени успешной регистрации ТМИ ИК (см. п. 3) и сравнивают его с интервалом T_0 времени ответственности ИК. При этом, если будут иметь место частные интервалы неуспешной регистрации ТМИ, т. е. интервалы времени, на которых достоверность зарегистрированной ТМИ ниже требуемой, тогда необходимо принять меры по повышению ее достоверности, а затем повторить определение достоверности ТМИ, зарегистрированной ПРС измерительных пунктов.

Основными приемами повышения достоверности ТМИ, зарегистрированной ПРС измерительных пунктов, являются:

- повышение мощности РГДУ БРТМС АКО;
- разнесение приема-передачи ТМИ по частоте. Для этого в состав соответствующей БРТМС (см. п. 1) вводят дополнительные АФУ и РГДУ, несущая частота которых отличается от несущей частоты основного РГДУ. При этом в состав соответствующих измерительных пунктов (см. п. 3) вводят дополнительные АФУ и ПРС;

- разнесение приема-передачи ТМИ по направлению. Частично этот прием реализуется при реализации приема разнесения приема-передачи по частоте. Полная реализация разнесения приема-передачи ТМИ по направлению достигается введением в состав наземного сегмента ИК (см. п. 2) дополнительных измерительных пунктов-дублиров;

- разнесение приема-передачи ТМИ по времени приема-передачи. Для этого в состав БРТМС вводится КЗУ, дополнительные формирователь группового телеметрического сигнала (основной коммутатор), РГДУ и АФУ. При этом в состав соответствующих измерительных пунктов (см. п. 3) вводят дополнительные АФУ и ПРС.

7. *Определение надежности подсистемы проведения телеметрических измерений ИК.* Надежность подсистемы проведения телеметрических измерений ИК рассчитывают для всех каналов БРТМС—ПРС, предусмотренных планом радиосвязи, состав технических средств которых сформирован в соответствии с п. 1—6. Если полученные

значения надежности подсистемы ниже заданного уровня, то необходимо принять меры по его повышению, в том числе, возможно, и путем введения в состав (см. п. 1 и 3) подсистемы соответствующих дополнительных средств.

8. *Определение соответствия спроектированной подсистемы проведения телеметрических измерений ИК заданным ресурсным ограничениям.* Достигается путем сравнения ресурсов, необходимых для реализации спроектированной подсистемы заданным. Если окажется, что размеры затрат ресурсов на реализацию подсистемы неприемлемы, то необходимо принимать соответствующие меры по поиску более эффективных альтернативных проектных решений, чем принятые (см. п. 1—7). При этом в качестве основного ресурсного ограничения может быть задана [5] допустимая стоимость создания подсистемы, а в качестве частных ограничений — допустимые суммарные: масса, физический объем, энергопотребление технических средств, требуемая площадь помещений для их размещения, численность обслуживающего персонала и др.

ВЫВОД

Предлагаемые подходы составляют основу обеспечения качества ИК АКО, так как они взаимосвязаны между собой и в комплексе обеспечивают достижение сформулированной цели проектирования подсистемы проведения телеметрических измерений ИК АКО. При проектировании ИК АКО важно в каждом из подходов выявить характеристики ИК АКО, которые наиболее значимо влияют на эффективность ИК. Затем привести все характеристики в единое оптимальное соответствие. Достижение последнего представляется возможным на основе системного подхода, включая создание и использование комплексных математических моделей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Надежность и эффективность в технике: Справочник.* В 10 т. Т. 1. Методология. Организация. Терминология / Под ред. А. М. Рембезы. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
2. *Надежность и эффективность в технике: Справочник.* В 10 т. Т. 3. Эффективность технических систем / Под ред. В. Ф. Уткина, Ю. В. Крючкова. М.: Машиностроение, 1988. 328 с.
3. *Капинос Е. Ф.* Выбор показателя эффективности системы сбора телеметрической информации измерительного комплекса космодрома и постановка задачи исследования путей повышения ее эффективности. М.: МАИ, 1997. 12 с.
4. *Капинос Е. Ф.* Выбор показателя эффективности подсистемы телеметрических измерений информационно-телеметрической системы // Исследование и моделирование ракетно-космических комплексов и их элементов. М.: МАИ, 1999. С. 18—21.
5. *Капинос Е. Ф.* Методика выбора рациональной структуры комплекса специального вооружения информационно-телеметрической системы группировки сил запуска космических аппаратов. Байконур: РВСН, 1998. 75 с.

А. А. ГРИШИН, инж.
ОАО "НПО "Эталон" (Омск)

Высокотемпературные платиновые термометры сопротивления

Максимальная температура применения промышленных платиновых термометров сопротивления, выпускаемых отечественными предприятиями, ограничивается 650 °С. Цель данной работы — выявить возможность эксплуатации термометров сопротивления при 1100 и 850 °С.

Для проведения эксперимента изготовили термометры сопротивлением 1 Ом в количестве 3 шт. Термометры собраны в четырехканальной сапфировой изоляционной трубке из платиновой проволоки диаметром 0,1 мм (отношение сопротивления при 100 °С к сопротивлению R_0 при 0 °С $W_{100} = 1,385$). Выводы изготовлены по четырехпроводной схеме из платиновой проволоки диаметром 0,5 мм и помещены в керамические изоляционные бусы. Подгонку значения R_0 на данном этапе не проводили, поэтому все расчеты выполняли с учетом действительных значений R_0 .

На первом этапе проверяли работоспособность термометров до температуры 1100 °С.

Отжиг термометров производили в печи МТП-2М при 1100 °С в кварцевой трубке. Сопротивление термометров (значение R_0 , R_{100} , R_i при 0, 100 °С и i -й температуре соответственно через каждые 100 °С) измеряли до отжига, после 50 и 200 ч отжига. Измерения проводили на установке УПСТ-2 методом прямого сличения с эталонной термопарой 2-го разряда ППО № 100 в диапазоне температур 300—1100 °С, термометры и эталонную термопару помещали в никелевый выравнивающий блок.

Результаты измерения приведены в таблице.

Согласно ГОСТ 6651—94, критериями работоспособности термометров являются отклонение от номинальной статической характеристики (НСХ) ($W_{100} = 1,3850$); стабильность значения R_0 ; значения электрического сопротивления изоляции при различных температурах, сохранение конструкции термометра.

Отклонение от НСХ

Предел допускаемого отклонения сопротивления от НСХ для класса допуска В в диапазоне температур от –220 до 1100 °С не должен превышать $\pm(0,3 + 0,005t)$ °С.

По данным измерений, термометры № 1—3 соответствуют этому требованию.

Следует отметить, что значения W_i (отношение сопротивления R_i при i -й температуре к R_0) получены через действительные значения R_0 .

Стабильность R_0

Согласно ГОСТ 6651—94, пребывание термометров класса допуска В при температуре верхнего предела в течение 250 ч не должно вызывать изменения R_0 более, чем на эквивалент, равный 0,3 °С или 0,0011 Ом.

За первые 50 ч отжига происходит стабилизация параметров термометров. Изменение R_0 оценивали по измерениям после 50 и 200 ч отжига.

За 50 ч работы при 1100 °С для ТСП № 1 $\Delta R_0 = +0,0015$ Ом, ТСП № 2 — $\Delta R_0 = +0,0016$ Ом и ТСП № 3 — $\Delta R_0 = +0,0014$ Ом.

После 200-часового отжига при 1100 °С для ТСП № 1 $\Delta R_0 = +0,0010$ Ом, ТСП № 2 — $\Delta R_0 = +0,0010$ Ом и ТСП № 3 — $\Delta R_0 = +0,0010$ Ом.

Это означает, что изменение R_0 практически совпадает с предельно допустимым значением. Можно предположить, что увеличение R_0 происходит главным образом за счет испарения платины с поверхности проволоки чувствительного элемента. Для того чтобы уменьшить изменение R_0 за счет испарения, необходимо увеличить диаметр проволоки.

Сопротивление изоляции

Согласно ГОСТ 6651—94, электрическое сопротивление изоляции между цепью чувствительного элемента термометра сопротивления и защитной

Номер термометра	Сопротивление термометра R_0 , Ом, при 0 °С				
	До отжига	После 50 ч отжига при 1100 °С	После 200 ч отжига при 1100 °С	После 50 ч отжига при 850 °С	После 200 ч отжига при 850 °С
1	0,9721	0,9736	0,9746	0,9747	0,9748
2	0,9720	0,9736	0,9746	0,9748	0,9750
3	0,9630	0,9644	0,9654	0,9655	0,9657

арматурой должно быть не менее 1000 МОм при 20 °С и 0,5 МОм при 850 °С (при более высоких температурах ГОСТом не оговорено).

Термометры сопротивления помещали в никелевый выравнивающий блок. Сопротивление изоляции измеряли между цепью чувствительного элемента и выравнивающим блоком. При температуре 20 °С электрическое сопротивление изоляции составило более 1000 МОм, при 850 °С — 50 МОм.

Сопротивление стандартного платинового чувствительного элемента (для сравнения) в керамической изоляции при 20 °С более 1000 МОм; при 600 °С (верхний предел диапазона) — 10 МОм.

Электрическое сопротивление изоляции соответствует требованиям ГОСТ 6651—94.

Далее оценивали возможность использования термометров сопротивления до температуры 850 °С.

Измерения, проведенные после 200 ч отжига при 1100 °С, были приняты за первоначальные для отжига при температуре 850 °С.

Отжиг термометров выполняли в течение 50 и 200 ч при температуре 850 °С для оценки стабильности R_0 .

Результаты измерений приведены в таблице.

Отклонение от НСХ

Отклонение термометров сопротивления от НСХ $W_{100} = 1,3850$ во всем диапазоне измерений соответствует норме для термометров класса допуска В.

Стабильность R_0

Отжиг в течение 250 ч при температуре 850 °С вызвал изменение R_0 для ТСП № 1 на +0,000255 Ом, ТСП № 2 — +0,0004 Ом и ТСП № 3 — +0,0003 Ом.

Эти значения не превышают максимально допустимое значение изменения R_0 .

На протяжении всех циклов отжига и измерений конструкция термометров сопротивления не разрушилась и сохранила работоспособность.

Таким образом, для температуры 1100 °С чувствительный элемент термометра сопротивления необходимо изготавливать из платиновой проволоки диаметром не менее 0,3 мм, что значительно упрощает конструкцию и увеличивает размеры чувствительного элемента. В связи с этим целесообразно изготавливать чувствительные элементы сопротивлением номиналом 1 Ом. До температуры 850 °С возможно изготовление промышленных термометров сопротивления класса допуска В номиналом 1 или 10 Ом из проволоки диаметром 0,1 мм.

Внимание! Информация

26.–29.02.08: Две крупные промышленные выставки под одной крышей!



SUBCONTRACTING FAIR
9-я выставка по СУБКОНТРАКТИНГУ
26 – 29 ФЕВРАЛЯ 2008 г.



Z – Выставка по субконтракtingу

Международный форум субпоставщиков

- Автомобилестроение и комплектующие для машиностроения
- ДНИ ЗАКУПЩИКОВ – место встречи поставщиков и покупателей
- Широкое международное участие

Одновременно: rohima 2008 – 6-я специализированная выставка композитных синтетических материалов



ИННОВАЦИИ - ТЕХНОЛОГИИ - ПРОИЗВОДСТВО



26–29 февраля 2008 г.

www.messe-intec.de

intec 2008 – 11-я выставка по станкостроению и промышленному оборудованию

Вместе с Z ожидаются более чем 1000 экспонентов в Лейпциге!

Подробная информация о Z и intec в Представительстве Лейпцигской ярмарки ГмБХ в России: Анна Зубова, Москва, тел.: 0495 223 0283, e-mail: moskau@leipzig-messe.ru



Добро пожаловать на Лейпцигскую Ярмарку!

А. А. МАЙОРОВ, д-р техн. наук

Рентгеновское телевидение в промышленном НК

Современное промышленное производство предъявляет жесточайшие требования к контролю качества, который зачастую должен производиться в автоматизированном режиме в условиях крупносерийного или массового производства. Рентгеновский НК является одним из важнейших и наиболее информативных методов, используемых для решения этой задачи в таких отраслях промышленности, как автомобильная, авиационно-космическая, атомная, химическая, металлургическая и др. Важнейшим преимуществом рентгеновского телевизионного метода контроля по сравнению с пленочной радиографией является его оперативность. В то же время современные технические средства, применяемые при реализации метода, позволяют получать результаты контроля не хуже, а зачастую лучше, чем при использовании пленки. Принцип метода ясен из функциональной схемы, приведенной на рис. 1.

Рентгеновское излучение, генерируемое источником, проходит сквозь объект контроля, при этом вследствие поглощения излучения материалом объекта пространственное распределение интенсивности прошедшего излучения несет информацию о распределении плотности вещества внутри

материала, т. е. является рентгеновским изображением его внутренней структуры.

С целью получения всей возможной информации о структуре объекта рентгеновский телевизионный комплекс оснащается манипулятором с несколькими степенями свободы механического перемещения объекта. После объекта рентгеновское излучение попадает на входной экран приемника рентгеновского излучения. После преобразования рентгеновского изображения в видимое (телевизионный монитор, компьютерный монитор) это изображение может архивироваться, обрабатываться и анализироваться для принятия решения о годности контролируемой детали. Перед входным экраном приемника может устанавливаться диафрагма с регулируемой программно или вручную с пульта размерами окна, чаще называемая шторками. Шторки необходимы для исключения прямой засветки приемника, что особенно актуально, если в качестве приемника используется рентгеновский электронно-оптический преобразователь (РЭОП) во избежание его выхода из строя, а также для механического форматирования и выбора участка для просвечивания. Кроме того, применение шторок способствует улучшению рентге-

новского изображения вследствие защиты приемника от нежелательного рассеянного рентгеновского излучения. Автоматизированная заслонка перекрывает рентгеновский пучок во время подготовительных работ (установка объекта контроля в нужное положение, предварительная установка окна шторок и др.). Для защиты персонала от вредного воздействия рентгеновского излучения основные элементы комплекса помещаются в кабину или помещение с радиационной защитой.

Рассмотрим более подробно основные элементы рентгеновского телевизионного комплекса.

Источники рентгеновского излучения

Выбор источника рентгеновского излучения для использования в рентгеновском телевидении (радиоскопии) имеет свою специфику по сравнению с пленочной радиографией. В основном это связано с требованием минимизации размеров фокусного пятна.

Специфика рентгеновских источников для радиоскопии

Фокусное пятно

В радиографии чаще всего реализуется проекционный вариант, когда приемник (рентгеновская пленка) находится в контакте с объектом, а увеличение изображения при этом равно 1 (рис. 2). Поэтому, даже используя рентгеновский источник с большим фокусным пятном, удастся получить изображения на пленке с большим пространственным разрешением (малым размытием деталей, как на рис. 2, а). В радиоскопии практически не удастся реализовать вариант с увеличением, равным 1, из-за необходимости установки дополнительных элементов между объектом и приемни-

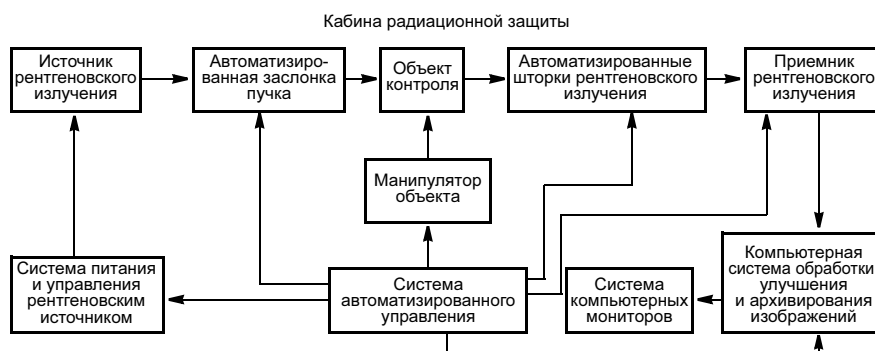


Рис. 1. Алгоритм реализации рентгеновского телевизионного метода

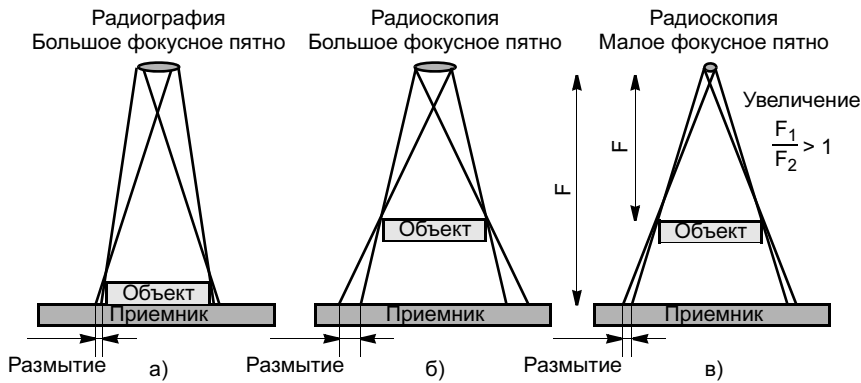


Рис. 2. Варианты геометрии просвечивания в радиографии и радиоскопии: а — геометрия просвечивания в радиографии с большим фокусным пятном; б — геометрия просвечивания в радиоскопии с большим фокусным пятном; в — геометрия просвечивания в радиоскопии с малым фокусным пятном

ком (шторок), а также необходимости позиционирования объекта (линейных перемещений, вращения и наклона) для реализации возможностей метода, что требует определенного расстояния от объекта до приемника. Поэтому при использовании в радиоскопии рентгеновских источников с большим фокусным пятном (рис. 2, б) пространственное разрешение оказывается низким, что неприемлемо для целей НК. Применение

рентгеновских источников с малым фокусным пятном (минифокусные и микрофокусные рентгеновские трубки, рис. 2, в) снимает это ограничение. Рассмотрение характеристик микрофокусных трубок выходит за рамки настоящей статьи. Что касается минифокусных трубок, то ведущими мировыми производителями выпускаются трубки с размерами фокусного пятна 0,2 и 0,4 мм по международному стандарту IEC 336 (или со-

ответственно 0,5 и 1,0 мм по европейскому стандарту EN 12543), которые считаются наиболее подходящими для целей рентгеновского телевидения.

Другие особенности

Требование минимизации фокусного пятна является главным, но не единственным требованием к источнику для получения хороших результатов в радиоскопии. Очень важно в процессе просвечивания поддерживать высокую стабильность высокого напряжения и тока трубки, низкий уровень пульсаций. Эти требования выполняются ведущими мировыми производителями рентгеновского оборудования, предназначенного для целей радиоскопии.

Приемники рентгеновского излучения

На рис. 3 представлена схема, иллюстрирующая основные типы применяемых приемников рентгеновского излучения, используемых для получения изображения.



Рис. 3. Схема приемников рентгеновского излучения

Рентгеновская пленка

Рентгеновская пленка до сих пор наиболее широко используется в промышленности в силу хорошо отработанной законодательной базы применения ее во всех отраслях промышленности, существующей инфраструктуры применения (фотолаборатории, оборудование, обученный персонал и т. п.). Однако объемы применения пленки с каждым годом уменьшаются в связи с развитием новых методов регистрации рентгеновских изображений, о которых речь пойдет дальше.

Запоминающие пластины

В последние годы интенсивно развивается новый метод регистрации рентгеновских изображений на основе использования специальных "фосфорных" запоминающих пластин многократного использования. Метод обладает существенными преимуществами перед пленочной технологией, так как, во-первых, не требует фотолабораторий, химикатов, соответствующего персонала и т. п., во-вторых, каждая пластина может использоваться несколько тысяч раз, в-третьих, время экспозиции по сравнению с пленкой в несколько раз меньше и, в-четвертых, изображение архивируется в цифровом виде¹.

Детекторы непрямого преобразования рентгеновского излучения

В детекторах прямого преобразования при воздействии рентгеновского кванта в толще полупроводника сразу генерируются электронно-дырочные пары. Под действием приложенного напряжения возникающий электронный ток может быть усилен и с помощью считывающей электроники преобразован в изображение. Детекторы непрямого преобразования

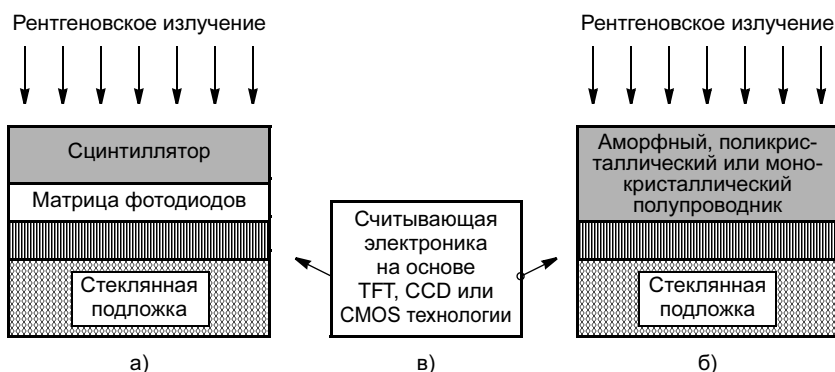


Рис. 4. Схема работы панелей прямого и непрямого преобразования: а — плоскопанельный детектор с непрямым преобразованием излучения; б — плоскопанельный детектор с прямым преобразованием излучения; в — считывающая электроника на основе TFT, CCD или CMOS технологий

отличаются тем, что рентгеновские кванты сначала взаимодействуют со сцинтиллятором с образованием фотонов света, а затем свет преобразуется или сразу в электрический сигнал, как в твердотельных плоскопанельных детекторах, или в поток электронов в РЭОП, который создает видимое изображение на выходном люминофорном экране. Учитывая, что в настоящее время в силу совокупности характеристик, определяющих соотношение "цена—качество", в радиоскопии наиболее широко используется в качестве детектора именно РЭОП, в дальнейшем мы более подробно рассмотрим принципы его работы, устройство и характеристики. Что касается твердотельных плоскопанельных детекторов, то схематически принцип работы панелей прямого и непрямого преобразования ясен из рис. 4.

Механической основой любого плоскопанельного детектора является стеклянная подложка, на которую устанавливается считывающая электроника.

TFT-технология

TFT (thin film transistors)-технология используется в основном в панелях на базе аморфного кремния или селена. Матрица TFT-транзисторов представляет собой достаточно простую структуру электронных переключателей. В накопительном конденсаторе каждой ячейки в процессе

экспозиции собираются электрические заряды, которые далее транспортируются к зарядочувствительным усилителям и аналого-цифровым преобразователям на выходе матрицы. Панели детекторов непрямого преобразования являются типичными сборками фотодиодов на активной TFT-матрице. Для детекторов с прямым преобразованием детекторный слой наносится прямо на эту матрицу. Панели могут быть очень больших размеров (30 × 40 см). Они имеют не очень высокое разрешение (типичное значение величины пикселя 127 мкм). Отличительной особенностью аморфного кремния является очень высокая радиационная устойчивость, что позволяет применять такие панели при высоких энергиях рентгеновских квантов. Вследствие не очень высоких физических параметров аморфных материалов как полупроводников это соответствующим образом сказывается на таких характеристиках панелей, как отношение сигнал/шум и контрастное отношение. Поскольку процесс производства панелей на базе аморфного материала и TFT-технологии требует специфического оборудования и условий производства, такие панели достаточно дороги.

CCD-технология

CCD (coupled charge device)-технология является одной из ведущих для получения высококаче-

¹ Майоров А. А. Компьютерная радиогрфия с использованием флуоресцентных запоминающих пластин — что это такое? // В мире НК. 2004. № 3 (25). С. 42—43.

ственных рентгеновских изображений. В отличие от матричных панелей типа TFT или CMOS в CCD-панелях считывание сигнала происходит путем транспортировки зарядовых пакетов вдоль кремниевой подложки. Преимуществом таких панелей является низкий шум и высокая чувствительность. Обычно в CCD-панелях используют оптоволоконные буферные вставки, позволяющие увеличить площадь приемного окна панели и служащие одновременно защитой от радиации. Но даже с таким дополнительным экранированием CCD-панели могут работать только при энергиях рентгеновских квантов меньше 50 кэВ. Как и в случае с аморфным кремнием, их производство требует специальных условий, поэтому они достаточно дороги.

CMOS-технология

CMOS (complementary metal oxide semiconductor) — эта технология, как и TFT с аморфным кремнием, является матричной сборкой. Основным преимуществом этой технологии перед остальными является использование хорошо развитой промышленной базы производства интегральных схем. Уровень шумов CMOS-панелей приблизился к уровню CCD-панелей, динамический диапазон в несколько раз выше. На CMOS-панелях получено самое высокое пространственное разрешение (размер пикселя несколько микрометров). Стоимость таких панелей хотя еще достаточно высока, тем не менее динамично снижается и скоро, на наш взгляд, станет меньше таковой для РЭОП со сравнимыми характеристиками.

Система рентгеновского телевидения на основе РЭОП

РЭОП используются для получения рентгеновских изображений уже более 50 лет. В настоящее время они благодаря достаточно высоким эксплуатационным характеристикам и приемлемой це-

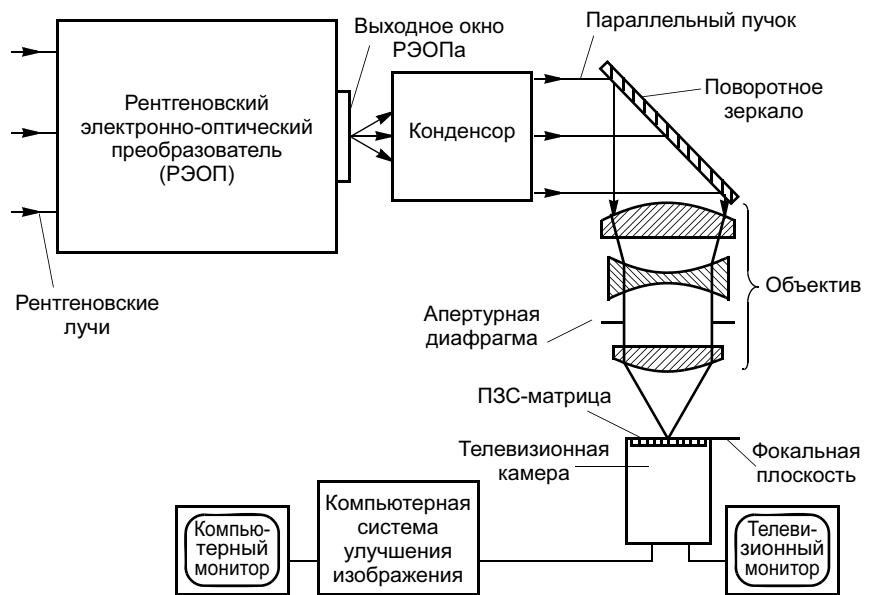


Рис. 5. Функциональная схема типовой рентгеновско-телевизионной системы, построенной с использованием РЭОП

не используются в большинстве рентгеновско-телевизионных систем, выпускаемых для промышленных целей (рис. 5).

РЭОП преобразует рентгеновское изображение на своем входе в изображение в видимом свете на выходном окне. Конденсор формирует параллельный пучок света, который после поворота на 90° на поворотном зеркале попадает на объектив, сфокусированный на бесконечность, который в свою очередь формирует изображение в своей фокальной плоскости. Поворот светового пучка на 90° вызван необходимостью вывода телевизионной камеры из зоны прямого воздействия рентгеновского излучения, которое приводит к выходу ее из строя (как уже упоминалось, ПЗС-матрицы радиационно неустойчивы). ПЗС-матрица телевизионной камеры преобразует свет в электрические сигналы, и с выхода камеры стандартный телевизионный сигнал поступает в компьютерную систему для улучшения, обработки и архивирования изображения. На мониторе системы можно наблюдать как прямое, так и обработанное изображение тестируемого объекта. Типовая система жестко настроена таким об-

разом, чтобы рентгеновское изображение максимального размера, который определяется диаметром входного окна РЭОП, трансформировалось на весь экран телевизионного монитора. Ее важнейшим параметром является пространственное разрешение выходного изображения.

Рассмотрим устройство и работу основных элементов рентгеновско-телевизионной системы.

Конструкция РЭОП

РЭОП представляет собой вакуумную колбу, содержащую ряд элементов (рис. 6). Рентгенов-

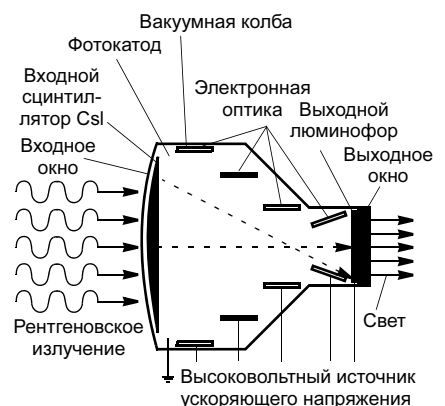


Рис. 6. Конструкция рентгеновского электронно-оптического преобразователя

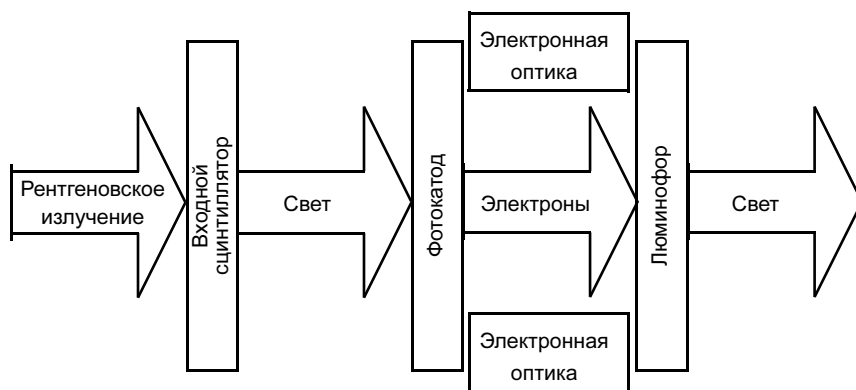


Рис. 7. Обобщенная схема процесса получения изображения с помощью РЭОП

ское излучение, прошедшее сквозь контролируемое изделие, через входное окно попадает на входной люминесцентный слой. Под воздействием рентгеновского излучения этот слой сцинтиллирует с излучением фотонов видимого света, которые, в свою очередь, воздействуют на фотокатод, испускающий в результате этого воздействия фотоэлектроны (рис. 7). Эти электроны ускоряются и фокусируются электронной оптикой на выходной люминесцентный слой и формируют на нем видимое изображение просвечиваемого объекта.

В РЭОП старой конструкции входное окно изготавливалось из стекла, эффекты рассеяния и поглощения в котором ухудшали характеристики прибора. В современных приборах с металлокерамическими колбами эти недостатки устранены применением входных окон из Al или Ti толщиной 0,25—0,5 мм, в которых минимальное затухание рентгеновского излучения сочетается с хорошими вакуумными свойствами.

Входной сцинтилляционный слой изготавливают из CsI, легированного Na, Ti или другими элементами путем напыления на алюминиевую подложку. CsI:Na растет на подложке в виде структуры монокристаллических острий, каждое диаметром около 0,005 мм и высотой около 0,5 мм. Толщина алюминиевой подложки 0,5 мм. Обычно для промышленных РЭОП сцинтиллятор имеет диа-

метр от 15 см (6") до 33 см (13") в зависимости от их назначения.

CsI хорошо поглощает рентгеновское излучение, причем в области энергий рентгеновских фотонов, обычно используемых в промышленной дефектоскопии (40—300 кэВ), поглощение происходит в основном за счет фотоэффекта (вклад в поглощение за счет эффекта Комптона становится существенным при энергиях рентгеновских квантов выше 300 кэВ). Слой CsI:Na генерирует при поглощении рентгеновских лучей голубой свет, который распространяется вдоль монокристаллических острий как по оптоволокну (т. е. без рассеяния) по направлению к фотокатоду.

Промежуточный слой (толщиной менее 0,001 мм) напыляется на внутреннюю поверхность слоя CsI:Na, а фотокатод (толщиной около 2 нм) наносится уже на этот слой (рис. 8). Промежуточный слой

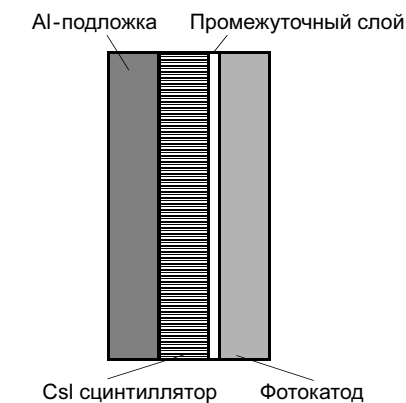


Рис. 8. Схема строения фотокатода

(например оксид индия) имеет высокую оптическую прозрачность и используется для химической изоляции сцинтилляционного слоя от фотокатода. В качестве фотокатода обычно используются сурьмяно-цезиевые соединения.

Световые фотоны, испускаемые входным слоем сцинтиллятора, поглощаются фотокатодом в результате фотоэлектрического эффекта с генерацией фотоэлектронов.

Вакуум в колбе необходим для беспрепятственной транспортировки электронов от фотокатода до выходного сцинтилляционного слоя. Для ускорения этих электронов обычно используется напряжение 25—35 кВ, а электронная оптика служит для фокусировки этих электронов на выходном сцинтилляционном слое. Величина электронного тока при этом может составлять от 10^{-8} до 10^{-7} А. Результатом ускорения электронов и их фокусировки является значительное увеличение интенсивности картины. Заметим, что в полетном пространстве трубки вследствие работы электронной оптики имеется точка пересечения электронных траекторий, что приводит к инвертированию изображения на выходном окне РЭОП по отношению к изображению на входном окне. Заметим также, что, как видно из рис. 6, входное окно со сцинтиллятором и фотокатодом несколько искривлено для выравнивания длин электронных траекторий и минимизации дисторсии изображения.

В РЭОП возможно изменение увеличения изображения путем изменения напряжений на электродах электронной оптики. Так, например, РЭОП с входным окном 9" (реальное входное окно диаметром 215 мм) может быть использован также для получения изображений диаметром 170 и 130 мм. Наличие трех дискретных увеличений характерно для большинства производимых РЭОП, хотя существуют и системы с возможностью непрерывного изменения увеличения. С уменьшении

ем поля просмотра на входном окне яркость картины на выходном окне также уменьшается (конечно, при сохранении мощности дозы облучения).

Большинство промышленных РЭОП имеют встроенные устройства поддержания вакуума, например ионный насос Пеннинга. Более подробное рассмотрение этого вопроса выходит за рамки этой статьи.

Выходной люминофор обычно изготавливают из ZnCdS:Ag, нанесенного на выходное окно (рис. 9). Этот слой испускает зеленый свет при поглощении быстрых электронов. Обычно его толщина составляет примерно 0,005 мм и от 25 до 35 мм в диаметре. Некоторые компании начали использовать в качестве люминофора современные материалы на основе гадолиния — Gd₂O₂S (Tb), что позволяет получить более качественное изображение на выходном окне. Этот люминофор имеет меньшее время послесвечения, что важно при изучении быстро движущихся объектов. На внутренней поверхности выходного люминофорного слоя нанесена тонкая пленка алюминия, которая, с одной стороны, является анодом для ускорения электронов, а с другой — отражает свет по направлению к выходному окну и защищает фотокатод от паразитной засветки.

Существует ряд конструкций выходных окон, включая стеклян-

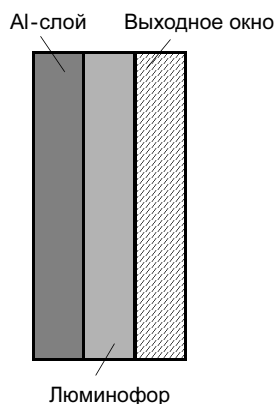


Рис. 9. Схема строения выходного люминофора

ные (с толщиной стекла до нескольких десятков миллиметров) с внутренними антиотражающими слоями, окна из свинцового стекла и оптоволоконные окна. Задачей этих конструкций является минимизация рассеяния света и различных отражений. Изображение, сформированное на выходном окне, поступает с помощью оптической системы на входную ПЗС-матрицу видеокамеры.

Оценим, для примера, сколько фотонов света образуется на выходном окне РЭОП при воздействии на входное окно одного рентгеновского кванта. Сцинтиллятор CsI наиболее эффективно поглощает рентген с энергиями около 50 кэВ. Пусть один такой квант попадает на входное окно. В результате его поглощения возникает примерно 2000 голубых фотонов, и примерно половина из них может достичь фотокатода. Если эффективность фотокатода 15 %, то образуется 150 фотоэлектронов. При ускоряющем напряжении 25 кВ, эффективности электронной оптики 90 % и при условии, что каждый электрон с энергией 25 кэВ образует 2000 фотонов на выходном сцинтилляторе, общее количество фотонов будет равно 270 000. Если из этого количества через выходное окно пройдет 70 % фотонов, то общее количество фотонов в световом импульсе, созданном воздействием одного рентгеновского кванта, будет равно 200 000.

Колба РЭОП изготавливается из стекла или металлокерамики, и входное и выходное окна впаиваются в эту колбу. Конструкция помещается в металлический корпус, в котором также размещаются свинцовый экран для радиационной защиты и экран из мю-металла для защиты электронной оптики от внешних магнитных полей. Входное окно обычно защищено плоской алюминиевой крышкой, которая является также защитой при маловероятном, но возможном взрыве вакуумной колбы.

Усиление яркости

Усиление яркости изображения получается в результате действия двух факторов: уменьшения площади изображения на выходном окне по сравнению с входным и ускорения электронов.

В первом случае электроны с относительно большой поверхности фотокатода фокусируются на небольшую площадку на выходном люминофоре, что увеличивает плотность электронов на единицу площади. Увеличение может быть оценено как отношение площадей фотокатода и выходного люминофора. Для 9" РЭОП с минимальным входным рабочим окном 130 мм и максимальным выходным окном 215 мм и при диаметре выходного окна 25 мм диапазон усиления яркости за счет фактора площади может изменяться в пределах от 27 до 74.

Во втором случае первоначально медленные фотоэлектроны ускоряются и в зависимости от величины приложенного напряжения усиление колеблется в пределах 50—100.

Результирующее усиление, равное произведению двух упомянутых, может быть, как мы видим, существенно выше 7000.

Коэффициент преобразования

Усиление яркости нелегко измерить, и эта характеристика рассмотрена лишь для иллюстрации возможностей РЭОП. Более легким для измерения параметром является коэффициент преобразования, который связывает яркость выходного окна РЭОП с мощностью дозы на его входном окне, что является полезным как для характеристики данного РЭОП, так и для сравнения РЭОП между собой.

Выражение для коэффициента преобразования может быть записано следующим образом: $K = Y/D$, где Y — яркость выходно-

го люминофора, $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$; D — мощность дозы на выходном окне, мР/с .

Обычно эта величина составляет 60—200 $\text{кд} \cdot \text{с}/(\text{м}^2 \cdot \text{мР})$ и выше.

Заметим, что картинка на выходном окне получается достаточно тусклой. Для сравнения, яркость обычной электрической лампочки составляет около 106 $\text{кд} \cdot \text{м}^{-2}$. Поэтому, чтобы непосредственно наблюдать зеленую картинку на выходе РЭОП, нужна затемненная комната и глаза, адаптированные к темноте, или чувствительная к зеленому свету видеокамера, что и реализуется в рентгеновском телевидении.

Контрастное отношение

Этот параметр характеризует способность РЭОП передавать контраст изображения. Контрастное отношение измеряется как отношение яркости изображения в центре открытого поля входного окна к яркости изображения свинцового диска, площадь которого составляет 10 % от площади открытого поля, помещенного в его центр: $R = Y_1/Y_2$, где Y_1 — яркость изображения открытого поля входного окна в его центре; Y_2 — яркость изображения свинцового диска, покрывающего 10 % площади поля.

Перечислим факторы, влияющие на контрастное отношение:

- рассеяние рентгеновского излучения на входном окне;
- рассеяние рентгеновского излучения на входном сцинтилляторе;
- рассеяние электронов электронной оптикой;

— рассеяние света на выходном люминофоре;

— рассеяние света на выходном окне.

Суммарное действие перечисленных эффектов приводит к так называемой вуалевой засветке, однако главный вклад все же дает рассеяние на выходном люминофоре.

Предельное пространственное разрешение

Этот параметр может быть измерен с помощью специальной свинцовой миры. С помощью нее определяют наивысшее пространственное разрешение (в парах линий на миллиметр), которое возможно получить. Рентгеновизорные изображения такой миры, полученные с помощью типичного 9" РЭОП при трех значениях электронного увеличения, в качестве примера приведены на рис. 10.

Этот параметр обычно измеряют в центре поля зрения, поскольку его значение уменьшается по мере продвижения к периферии изображения из-за влияния электронной оптики. Эта характеристика зависит от величины поля зрения на входном окне РЭОП, типа используемой видеокамеры, наличия компьютерной обработки изображения. В таблице приведены типичные величины предельного пространственного разрешения 9" РЭОП, полученные непосредственно на его выходном окне, на выходе цифровой видеокамеры (с ПЗС-матри-



Рис. 10. Примеры компьютерного улучшения изображения

цей размером 2/3" и количеством пикселей в матрице 1380 × 1030) и после компьютерного улучшения изображения (см. рис. 10). Видим, что разрешение системы в целом меньше, чем на выходном окне РЭОП, за счет ограниченного разрешения ПЗС-матрицы, электронных шумов телевизионного тракта, неточностей юстировки и aberrаций оптики.

Значительное улучшение может быть получено при использовании компьютерной обработки изображения. Так, для случая максимального электронного увеличения РЭОП это значение составляет более 5,0 пар линий/мм.

Пространственная неоднородность

РЭОП-изображение в принципе однородного объекта обычно несколько ярче в центре, чем на периферии вследствие неодинакового усиления яркости РЭОП в различных участках поля зрения и геометрии просвечивания объекта конечных размеров при использовании точечного источника. Этот эффект проиллюстри-

Размер поля, мм	Предельное пространственное разрешение, пар линий/мм		
	Выходное окно РЭОП	Цифровая видеокамера с объективом 35 мм	Компьютерное улучшение изображения
215	2,5	2,2	3,1
170	5,8	2,8	4,0
130	6,4	3,1	5,0

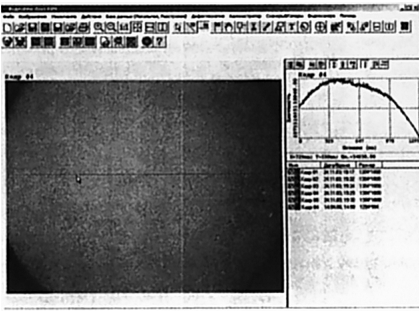


Рис. 11. РЗОП-изображение однородного объекта

рован на рис. 11, где кроме самого изображения показана еще и кривая изменения интенсивности, полученная с помощью компьютера.

Еще раз заметим, что этот эффект интегральный, т. е. зависит не только от РЗОП, но и от геометрии просвечивания, оптики, передающей изображение от выходного окна к видеокамере, и от самой видеокамеры. В современных системах этот эффект может учитываться и компенсироваться с помощью компьютерных средств.

Пространственная дисторсия

Последней характеристикой РЗОП, которую мы здесь рассмотрим, является пространственная дисторсия. Каждый из выпускаемых РЗОП (в отличие от плоскочувствительных детекторов) обладает недостатком, который возникает вследствие неодинакового увеличения деталей, находящихся

в различных областях поля зрения. Этот эффект проиллюстрирован на рис. 12, где показано рентгеновское изображение регулярной проволочной сетки.

Изображение слева получено с помощью РЗОП одной из старых моделей, справа — с помощью современного прибора. Как и в предыдущем случае, на конечном изображении этот эффект может быть минимизирован или сведен к нулю с помощью компьютерных средств.

Видеокамера, фрэймграббер и компьютерная обработка

Оценим, какой размер пикселя должна иметь видеокамера, чтобы правильно воспроизвести рентгеновское изображение, получаемое на выходном окне РЗОП. В соответствии с таблицей, паспортное значение пространственного разрешения 9" РЗОП при входном окне 215 мм составляет 5,2 пар линий/мм. Легко подсчитать, что при диаметре выходного окна 25 мм и указанном разрешении мы сможем различить на выходном окне элемент с минимальным размером 11 мкм. Таким образом, размер пикселя ПЗС-матрицы видеокамеры по крайней мере не должен превышать этой величины, а на самом деле должен быть существенно меньше. Однако вследствие электронных шумов телевизионного тракта, неточностей юстировки и аберраций оптики даже

для цифровой видеокамеры с размером пикселя матрицы 6,45 мкм реальное разрешение системы даже после компьютерной обработки регулярной проволочной сетки получается примерно 3,1 пар линий/мм.

Для многих задач необходим захват телевизионных кадров и сохранение их в памяти компьютера для последующей обработки. Эту задачу решает устройство, называемое фреймграббером (frame-grabber). Его принципиальная схема проста. Для видеокамер, на выходе которых формируется аналоговый видеосигнал, этот сигнал направляется в аналого-цифровой преобразователь (АЦП) фреймграббера, а затем полученное цифровое представление изображения записывается в буфер собственной памяти. Точность АЦП характеризуется числом цифровых уровней между минимальным и максимальным значениями аналогового сигнала. Для типичных значений отношения сигнала/шум в телевизионных сигналах потери информации не происходит при 8 битах оцифровки (256 уровней). Содержимое буфера постоянно обновляется с частотой смены кадров. По специальной команде в нем фиксируется необходимое изображение, которое с заданным именем переписывается в память компьютера. По завершению этой сравнительно медленной операции можно приступить к захвату следующего кадра. В состав фреймграббера, работающего с цифровыми видеокамерами, АЦП не входит, в остальном его работа аналогична предыдущему.

После сохранения полученного рентгеновского изображения в памяти компьютера обычно используют специальное программное обеспечение для обработки и улучшения полученных изображений, однако описание этих процедур выходит за рамки настоящей статьи.

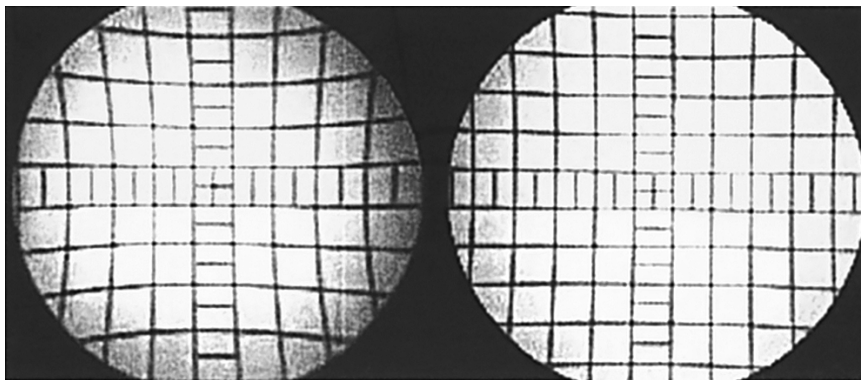


Рис. 12. Дисторсия изображения

"В мире неразрушающего контроля", 2007, № 1

С. В. МАРУТЬЯН, канд. техн. наук
(ФГУП ЦНИИчермет им. И. П. Бардина),
С. С. МАРУТЬЯН, инж., В. А. НЕВРОВСКИЙ, д-р физ.-мат. наук
("МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского)

Методы оценки нагрева длинномерных изделий при нанесении покрытий из расплава

Введение. Металлические покрытия диффузионного типа наносят при контактном взаимодействии основы с металлом покрытия в условиях изотермического нагрева. Температура контактирующих материалов должна соответствовать условиям интенсивного протекания их взаимной диффузии, что является определяющим фактором при формировании покрытия.

Продолжительность формирования покрытия τ складывается из времени нагрева $\tau_{\text{прогр}}$ покрываемого изделия до температуры насыщающей среды, периода задержки перед началом диффузионного и химического взаимодействия $\tau_{\text{лат}}$ и собственно времени формирования покрытия $\tau_{\text{форм}}$:

$$\tau = \tau_{\text{прогр}} + \tau_{\text{лат}} + \tau_{\text{форм}}$$

Собственно формирование покрытия начинается с момента прогрева покрываемого материала до требуемой температуры, и наиболее медленным в данном случае является именно прогрев. Поэтому производительность оборудования для нанесения покрытия определяется главным образом продолжительностью нагрева изделия до температуры его образования.

Разработан экспериментальный вариант линии алюминирования, цинкования стальной проволоки. Покрытие наносят в установке проходного типа, входной и выходной каналы которой расположены ниже уровня расплава¹. При проектировании промышленных вариантов таких установок возникла необходимость оценки длины камеры нанесения покрытия, а в случае многоручьевых установок — также и расстояния между ручьями. Размеры камеры нанесения покрытий определяются интенсивностью теплообмена между находящимся в камере расплавом и движущимся изделием.

В данной работе рассмотрены имеющиеся математические модели нагрева цилиндрических и плоских длинномерных изделий в жидкой среде (например в расплаве металла). Предложены простые формулы для расчета продолжительности нагрева длинномерных изделий, погруженных в расплав металла. Произведена оценка нагрева этих изделий, движущихся с постоянной скоростью U_0 сквозь расплав.

Модели нагрева покоящихся и движущихся в расплаве изделий. Нагрев движущихся длинномерных изделий можно оценить двумя способами. С одной стороны, можно воспользоваться решениями задач о нагреве цилиндра и пластины, движущихся с постоянной скоростью U_0 в нагревательной камере конечной длины L [1]. С другой стороны — решениями задач о нестационарном нагреве неподвижного бесконечно длинного цилиндра или пластины, помещенных в расплав [2, 3], и приближенно определить длину по формуле

$$L = U_0 t, \quad (1)$$

где t — время, необходимое для прогрева изделия в целом или его отдельных участков (например, середины изделия или его поверхности) до заданной температуры, близкой к температуре расплава.

В данной работе получено условие, при котором оба подхода дают практически одинаковые результаты.

Следует иметь в виду, что для движущихся [1] и покоящихся в расплаве [2] изделий получены решения при определенных граничных условиях на поверхности изделия в виде теплового потока q , передаваемого к изделию в результате конвекции (так называемое граничное условие третьего рода):

$$q = \alpha(T_1 - T_n), \quad (2)$$

где T_1 — температура расплава; T_n — температура поверхности изделия, зависящая от продольной

¹ Патент 2199602 (РФ).

координаты z в случае движущегося изделия или от времени нагрева t в случае покоящегося изделия; α — коэффициент теплоотдачи от расплава к изделию.

В соответствии с правилами расчета конвективного теплообмена величину α необходимо определять из критериальных уравнений, подходящих по физической сущности к решаемой задаче и с учетом геометрического подобия нагревателя и изделия. В работе [1] для расчета нагрева движущейся в жидком цинке проволоки использовали критериальные уравнения, установленные для обтекания труб и плоских пластин жидкометаллическими теплоносителями [3, 4]. Эти уравнения устанавливают зависимость критерия подобия тепловых процессов — числа Нуссельта $Nu = \alpha l / \lambda_{ж}$ от чисел Пекле $Pe = U_0 l / \chi$ и Рейнольдса $Re = \rho U_0 l / \mu$ (U_0 — скорость течения жидкости, χ — коэффициент температуропроводности жидкости, равный $\lambda_{ж} / C_p$, C и ρ — теплоемкость и плотность жидкости, μ — коэффициент вязкости жидкости, l — характерный размер обтекаемого жидкостью геометрического тела, например его диаметр, $\lambda_{ж}$ — коэффициент теплопроводности жидкости).

В работе [1] определены значения α для проволоки, движущейся со скоростью 0,2—2,0 м/с в расплаве цинка. Для этого по соответствующим критериальным уравнениям работ [3, 4], полученным экспериментально на трубах диаметром, как минимум, на порядок больше диаметра проволоки, определили число Nu , а затем α . Оказалось, что значения α лежат в пределах от около 7 до 20 Вт/(см² · К) в зависимости от диаметра цилиндра (1,0—3,0 мм). Интересно отметить, что в работе [6] значение коэффициента теплоотдачи α принято равным 8 Вт/(см² · К) для изучаемого диапазона диаметров, причем получено удовлетворительное согласие температуры стальной проволоки, рассчитанной численным методом и измеренной на выходе из расплава цинка.

Таким образом, имеем следующие модельные решения задач о нагреве длинномерных изделий.

1. Нагрев движущегося цилиндрического изделия [1]:

$$\theta(r, z) = \frac{h}{a} \sum_{s=1}^{\infty} \frac{J_0(\gamma_s r)}{J_0(\gamma_s a)} \frac{1}{(h^2 + \gamma_s^2) \rho_s} \times [k_{s1} \exp k_{s2} z - k_{s2} \exp k_{s1}(z - L)]. \quad (3)$$

Здесь θ — безразмерная температура, равная $\frac{T_1 - T}{T_1 - T_0}$ (T_1 — температура расплава, T_0 — начальная температура цилиндра). Граничное условие,

учитывающее теплоотдачу к поверхности цилиндра, дает уравнение для определения γ_s :

$$\gamma_s = \frac{\beta_s}{a}; h = \frac{\alpha}{\lambda}; \beta_s J_1(\beta_s) - \frac{\alpha a}{\lambda} J_0(\beta_s) = 0, \quad (4)$$

где a — радиус цилиндра; J_0, J_1 — функции Бесселя нулевого и первого порядка соответственно; λ — коэффициент теплопроводности материала цилиндра.

Корни уравнения (4) приведены, в частности, в работе [2]. Показатели k_{s1} и k_{s2} определяются из уравнений

$$k_{s1} = \frac{U_0}{2\chi} + p_s; k_{s2} = \frac{U_0}{2\chi} - p_s; p_s = \sqrt{\gamma_s^2 + \frac{U_0^2}{4\chi^2}}, \quad (5)$$

где χ — коэффициент температуропроводности материала цилиндра.

2. Нагрев движущегося плоского длинномерного изделия [1]:

$$\theta = h \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos(\gamma_n x)}{[(h^2 + \gamma_n^2)l + h] p_n \cos(\gamma_n l)} \times [k_{n1} \exp k_{n2} z - k_{n2} \exp k_{n1}(z - L)]. \quad (6)$$

Здесь l — половина толщины плоского изделия. Коэффициенты k_n вычисляются из выражения (5), где γ_s заменено на γ_n . Параметр γ_n определяется из уравнения, аналогичного уравнению (4):

$$\gamma l \operatorname{tg}(\gamma l) = \frac{\alpha l}{\lambda}. \quad (7)$$

3. Нестационарный нагрев неподвижного цилиндрического изделия [2]:

$$\theta(r, t) = \frac{2h}{a} \sum_{s=1}^{\infty} \exp(-\chi \gamma_s^2 t) \frac{J_0(\gamma_s r)}{J_0(\gamma_s a)} \frac{1}{(h^2 + \gamma_s^2)}, \quad (8)$$

параметр γ_s здесь также определяется из уравнения (4).

4. Нестационарный нагрев неподвижного плоского изделия [2]:

$$\theta = 2h \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-\chi \gamma_n^2 t) \frac{\cos(\gamma_n x)}{\cos(\gamma_n l)} \frac{1}{(\gamma_n^2 + h^2)l + h}, \quad (9)$$

параметр γ_s определяется из уравнения (7).

Решения задач о нагреве движущихся цилиндра и плоского изделия получены для ванн с расплавом конечной длины L . Естественно, что температура

изделия вне расплава меньше, чем в расплаве, поэтому максимум температуры изделия в расплаве достигается внутри ванны, в точке, смещенной от середины в сторону его перемещения. В представляющих практический интерес случаях температура изделия должна принимать значение, близкое температуре расплава. Это значит, что при значениях безразмерной температуры $\theta \ll 1$, в суммах, входящих в формулы (3) и (6), остаются практически только первые слагаемые с индексами $s = 1$ или $n = 1$. Исследуя на экстремум первое слагаемое, получаем, что максимум температуры изделия достигается на расстоянии z_{\max} от входа в расплав:

$$z_{\max} = \frac{k_{s1}L}{k_{s1} - k_{s2}}, \quad (10)$$

При этом температура изделия

$$\theta = \frac{h}{a} \frac{J_0(\gamma_s r)}{J_0(\gamma_s a)(h^2 + \gamma_s^2) \rho_s} \times (k_{s1} - k_{s2}) \exp \frac{k_{s1}k_{s2}}{k_{s1} - k_{s2}} L.$$

Подставляя в это выражение k_{s1} и k_{s2} из формулы (5), получаем

$$\theta = \frac{2h}{a} \frac{J_0(\gamma_1 r)}{J_0(\gamma_1 a)} \frac{1}{(h^2 + \gamma_s^2)} \exp \left[- \frac{\gamma_1^2 L}{2 \sqrt{\gamma_1^2 + \frac{U_0^2}{4\chi^2}}} \right]. \quad (11)$$

При $\frac{U_0}{2\chi} \gg \gamma_1$ эта формула переходит в уравнение (8), если t , U_0 и L связаны между собой соотношением (1). Ограничившись, например, менее чем 10 %-ным отличием значений θ , полученных при решении уравнений (8) и (11), получаем, что скорость изделия должна удовлетворять условию

$$U_0 \geq \sqrt{20} \gamma_1 \chi. \quad (12)$$

Примем значение коэффициента $\alpha = 8 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$, которое приведено как экспериментальный факт, типичный для нагрева стальной проволоки в расплавленном цинке [5], и незначительно расходится с оценками, полученными по критериальным уравнениям. Для стали $\chi = 0,12 \text{ см}^2/\text{с}$, $h = \alpha/h = 8/0,46 = 17,4 \text{ см}^{-1}$. Если диаметр проволоки составляет

2 мм, то при $a = 0,1 \text{ см}$ $ha = 1,74$ и из выражения (4) $\beta_1 = 1,52$ и $\gamma_1 = \beta_1/a = 15,2$. В этом случае решение (8) отличается от решения (11) менее, чем на 10 % уже при скорости $U_0 \geq \sqrt{20} \gamma_1 \chi \approx 8,1 \text{ см}/\text{с}$. Как правило, покрытие наносится с большей скоростью. Таким образом, на практике это условие выполняется со значительным запасом.

Аналогичную оценку U_0 в случае нагрева плоских изделий также необходимо проводить по формуле (12), но величина параметра γ_1 здесь другая. Она определяется не из выражения (4), а из аналогичного условия для плоского изделия (7). При выполнении условия (12) наряду с решением (6) можно пользоваться первым слагаемым из выражения (9) и формулой (1).

Модели для консервативных оценок нагрева.

Ввиду некоторой неопределенности, присущей вычислению коэффициента теплоотдачи α , особенно для проволоки, которая представляется слишком тонкой в сравнении с трубами, для которых первоначально были получены критериальные уравнения, было бы желательно иметь еще и консервативную оценку темпа нагрева изделий. Эта оценка должна давать минимальную скорость роста температуры изделий рассматриваемой формы. Очевидно, эта оценка наиболее точна в том случае, когда теплота от расплава к изделиям может передаваться только теплопроводностью и конвективной составляющей можно пренебречь. Такая оценка особенно ценна, например, при нанесении металлических покрытий на изделия погружением их в расплав, так как в этом случае изделия действительно какое-то время не движутся относительно расплава, и принудительная конвекция в этом случае отсутствует. Эту оценку можно получить из решений задач о нагреве бесконечно длинного цилиндра, погруженного в сплошную неограниченную и не перемешиваемую среду [2], бесконечно длинной полосы в тех же условиях [6]. В этих моделях нагрева используется так называемое граничное условие четвертого рода, заключающееся в равенстве температур и тепловых потоков на границе изделия и нагревающей среды.

Нестационарный нагрев цилиндра при граничном условии четвертого рода описывается формулой [3]

$$\theta = \frac{T_1 - T}{T_1 - T_0} = \frac{4\lambda_1\lambda_2\chi_2}{\pi^2} \int_0^\infty \frac{e^{-\mu^2 Fo} J_0\left(\mu \frac{r}{a}\right) J_1(\mu) d\mu}{\mu^2 (\psi^2 + \varphi^2)}. \quad (13)$$

Вспомогательные функции $\psi(\mu)$ и $\varphi(\mu)$ определяются формулами

$$\psi = \lambda_1 \sqrt{\chi_2} J_1(\mu) J_0(\sqrt{k} \mu) - \lambda_2 \sqrt{\chi_1} J_0(\mu) J_1(\sqrt{k} \mu);$$

$$\varphi = \lambda_1 \sqrt{\chi_2} J_1(\mu) Y_0(\sqrt{k} \mu) - \lambda_2 \sqrt{\chi_1} J_0(\mu) Y_1(\sqrt{k} \mu),$$

где J_0, J_1 — функции Бесселя первого рода; Y_0, Y_1 — функции Бесселя второго рода; a — радиус цилиндра. Время t вошло в безразмерный параметр — число Фурье Fo , равное $\frac{\chi_1 t}{a^2}$ и являющееся одним

из критериев подобия теории теплопроводности. В решении нет коэффициента теплоотдачи α , при этом температура нагреваемого цилиндра определяется тепловыми свойствами материала цилиндра и среды, в которой он находится. Коэффициент

$k = \frac{\chi_1}{\chi_2}$ представляет собой отношение температу-

ропроводностей материала изделия и нагревающей среды. Индекс "1" относится к материалу цилиндра, а "2" — к материалу среды.

Нагрев плоского изделия толщиной $2l$, помещенного в ванну неограниченного размера с расплавом, можно рассчитать по формулам, приведенным в работе [6]. Зависимость безразмерной температуры $\theta_{\text{пов}}$ поверхности пластины от числа Фурье Fo , т. е. в конечном счете от времени прогрева t , вычисляется по формуле

$$\theta_{\text{пов}} = \frac{K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon} - \frac{2K_\varepsilon}{(1 + K_\varepsilon)^2} \sum_{n=1}^{\infty} (-g)^{n-1} \operatorname{erfc}\left(\frac{n}{\sqrt{Fo}}\right). \quad (14)$$

Здесь K_ε — параметр, характеризующий тепловую

активность пластины, равный $\sqrt{\frac{\lambda_1 C_1 \rho_1}{\lambda_2 C_2 \rho_2}}$; $g = \frac{1 - K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon}$.

Температура поверхности изделия в момент $t = 0$ определяется только тепловой активностью пластины K_ε :

$$\theta_{\text{пов}}(t = 0) = \frac{K_\varepsilon}{1 + K_\varepsilon}.$$

Функция $\operatorname{erfc}(x) = 1 - \Phi(x)$, где $\Phi(x)$ — функция ошибок:

$$\Phi(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\xi^2} d\xi.$$

Температура в середине пластины

$$\theta = 1 - \frac{2}{1 + K_\varepsilon} \sum_{n=1}^{\infty} (-h)^{n-1} \operatorname{erfc}\left(\frac{2n-1}{2\sqrt{Fo}}\right). \quad (15)$$

Перейдем к анализу приведенных выше решений с тем, чтобы получить более простые и удобные для инженерных расчетов соотношения. Решения (13)—(15) громоздки и неудобны для применений в инженерной практике. Однако, учитывая, что для сформулированных здесь целей представляют интерес распределения температуры, достигнутые на поздних стадиях нагрева, когда θ близко к нулю, можно найти приближенные, но простые и удобные формулы для вычисления θ .

Во-первых, рассмотрим случай одинаковых тепловых свойств материала изделия и нагревающей среды: $\lambda_1 = \lambda_2$ и $\chi_1 = \chi_2$.

Можно проверить, что при равенстве коэффициентов λ и χ для изделия и расплава функция $\psi = 0$, а функция $\varphi = \frac{2\lambda\sqrt{\chi}}{\pi\mu}$. Тогда безразмерная температура

$$\theta = \int e^{-\mu^2 Fo} J_1(\mu) J_0\left(\mu \frac{r}{a}\right) d\mu. \quad (16)$$

Температуру цилиндра можно определить приближенно, заменив функцию $J_1(\mu)$ в выражении (16)

приближенным выражением $J_1(\mu) \approx \frac{\mu}{2} - \frac{\mu^3}{16} + \frac{\mu^5}{384}$,

$$\theta = \frac{1}{4Fo} \exp\left(-\frac{r^2}{4a^2 Fo}\right) - \frac{1}{32Fo^2} \left(1 - \frac{r^2}{2a^2 Fo}\right) + \frac{1}{384Fo^3} \left(1 - \frac{3r^2}{4Fo a^2}\right).$$

1. Температура на оси (при $r = 0$):

$$\theta = \frac{1}{4Fo} \left(1 - \frac{1}{8Fo} + \frac{1}{96Fo^2}\right);$$

2. Температура поверхности цилиндра ($r = a$):

$$\theta = \frac{1}{4Fo} \left(1 - \frac{3}{8Fo} + \frac{5}{48Fo^2}\right).$$

Эти формулы справедливы при $Fo > 1$.

Если тепловые свойства материала изделия и среды неодинаковы, то приходится выполнять численное интегрирование, используя таблицы специальных функций. При вычислении необходимо отдельно определять значение знаменателя формулы (10)

при $\mu = 0$. При $\mu = 0$ вспомогательная функция $\psi = 0$, а функция φ обратно пропорциональна μ :

$$\varphi = -2 \frac{\lambda_2 \sqrt{\lambda_2}}{\mu \pi} + O(\mu),$$

поэтому знаменатель формулы (1), равный $(\mu \varphi(\mu))^2$, в нуль не обращается.

Поскольку нас интересуют асимптотические значения температуры, близкие к температуре расплава, достигающиеся спустя относительно длительное время, то главный вклад в интеграл вносит подынтегральная функция при $\mu \ll 1$. Разлагая соответствующие функции Бесселя в выражении (13) в степенной ряд по μ и выполняя аналитическим образом интегрирование, получаем следующие приближенные формулы для вычисления температуры поверхности и центра цилиндра. Температура в центре цилиндра

$$\theta_{\text{ц}} = \frac{\lambda_1}{4\lambda_2} \frac{1}{Fo} \left[1 - (1/8 + D) \frac{1}{Fo} \right], \quad (17)$$

где параметр D учитывает неравенство тепловых свойств среды и цилиндра:

$$D = 0,5772 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 0,0772k - 0,5 + \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - k \right) \ln(\sqrt{k}/2).$$

Температура поверхности цилиндра

$$\theta_{\text{пов}} = \frac{\lambda_1}{4\lambda_2} \frac{1}{Fo} \left[1 - (3/8 + D) \frac{1}{Fo} \right]. \quad (18)$$

Для проверки этих формул численным интегрированием уравнения (13) был выполнен расчет продолжительности нагрева стального цилиндра в расплаве цинка. Для расчета приняты следующие параметры стального изделия: $\lambda_1 = 0,46$ Вт/(см · К), теплоемкость $C_1 = 0,493$ Дж/(г · К), плотность $\rho_1 = 7,85$ г/см³, коэффициент температуропроводности $\chi_1 = 0,12$ см²/с. Для твердого цинка $\lambda_2 = 0,95$ Вт/(см · К), $C_2 = 0,48$ Дж/(г · К), $\rho_2 = 7,14$ г/см³, коэффициент температуропроводности $\chi_2 = 0,277$ см²/с. Следует заметить, что у жидкого цинка теплопроводность меньше и составляет $\lambda_2 = 0,59$ Вт/(см · К), поэтому данный расчет, в котором взято λ_2 для твердого цинка, не вполне подходит для примера с цинкованием стального цилиндра. Однако этот расчет полезен в методическом смысле, так как в этом примере различия в тепловых свойствах изделия и греющей среды больше. И если наблюдается хорошее согласие приведенных выше приближенных

формул (17) и (18) с численным расчетом, то в реальном случае нагрева стального цилиндра в расплавленном цинке это согласие будет еще лучше.

Действительно, оказалось, что значения температуры поверхности и центра цилиндра, согласно формулам (17) и (18), отличаются от численного расчета не более чем на 5 % при $Fo \geq 0,9$ и погрешность убывает с ростом числа Фурье. Обращаясь к тем значениям безразмерной температуры, которые представляют интерес для случая нанесения металлических покрытий из расплава на цилиндрические изделия в проходных установках ($\theta < 0,15$), из формул (17) и (18) получаем, что в этом случае число Фурье должно быть $Fo \geq 1,0$, т. е. эти формулы вполне пригодны.

Аналогично можно получить приближенные выражения для оценки температуры θ при нагреве плоского изделия.

Формула для вычисления температуры поверхности плоских изделий при $Fo \geq 1$:

$$\theta_{\text{пов}} = \frac{K_{\varepsilon}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{Fo}} \left[1 - \frac{1}{6K_{\varepsilon}(1 + K_{\varepsilon})Fo} \sum_{n=1}^{\infty} (-g)^{n+1} (2n-1)^3 \right]; \quad (19)$$

температура в центре плоского изделия

$$\theta_{\text{ц}} = \frac{K_{\varepsilon}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{Fo}} \left[1 - \frac{4}{3(1 + K_{\varepsilon})^2} \frac{1}{Fo} \sum_{n=1}^{\infty} (-g)^n - 1 n^3 \right]; \quad (20)$$

средняя температура плоского изделия

$$\theta \approx \frac{K_{\varepsilon}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{\sqrt{Fo}}. \quad (21)$$

Эти формулы применимы приблизительно с той же точностью, что и (17) и (18) для цилиндрических изделий, если $Fo \geq 1$.

Аналитические решения для движущихся сквозь расплав цилиндрических или плоских изделий при граничных условиях четвертого рода неизвестны или, по крайней мере, недоступны. Поэтому нельзя как в случае граничного условия третьего рода (2) непосредственно сопоставить решения для нагрева неподвижных и движущихся изделий и получить условие, аналогичное формуле (12). Установлено, что при граничных условиях третьего рода (когда теплообмен учитывается коэффициентом теплоотдачи α) длина ванны L с расплавом связана соотношением (1) с временем нагрева t покоящегося изделия, если скорость движения U_0 удовлетворяет условию (12). Анализ задачи с граничным условием

четвертого рода показывает, что и в этом случае также имеется связь L и t согласно соотношению (1). При этом продолжительность нагрева определяется по формулам (17)—(21) для тел различной формы. Условие применимости этой связи может только численно и, по-видимому, не очень сильно отличаться от условия (12), справедливого при граничном условии третьего рода.

Исходя из этого, можно приближенно считать, что длина пути нагрева связана с временем нагрева t изделия соотношением (1). Продолжительность нагрева можно определить из соответствующих уравнений (17)—(21), обращая внимание на то, что

она связана с числом Фурье $t = \frac{Fob^2}{\chi_1}$ (b — радиус

цилиндра a или половина толщины плоского изделия l).

Оценка поперечного размера зоны влияния изделия на ванну расплава. До сих пор рассматривались модели нагрева изделий, в которых ванна с расплавом была неограниченной. В реальных условиях ванны имеют конечный размер, причем подвод теплоты к расплаву осуществляется на ее периферии. Если изделие постоянно движется со скоростью U_0 , то мощность подогрева ванны Q без учета потерь теплоты от расплава через теплоизоляцию ванны должна равняться теплоте, выносимой из расплава движущимся изделием:

$$Q = U_0 S C (T - T_0),$$

где S — площадь поперечного сечения изделия; C — теплоемкость его материала.

Если в методических целях допустить отсутствие внешнего нагрева, то поперечный размер ванны следует выбирать таким, чтобы понижение температуры расплава на ее периферии было пренебрежимо малым. Именно из этого условия можно определить поперечный размер области, где вводимое в расплав изделие эффективно понижает его температуру. При создании многоручьевой установки нанесения металлических покрытий на проволоку проходного типа этот размер можно будет использовать для оценки минимального расстояния между ручьями. Например, условно можно принять это расстояние равным удвоенному поперечному размеру области влияния изделия на температуру расплава.

Оценить поперечный размер этой области можно, только используя модель с граничным условием четвертого рода. Для этого служит решение, полученное в работе [2] для внешней по отношению

к изделию области нагрева, т. е. в нашем случае применимое к расплаву:

$$\theta = \frac{2\lambda_1 \sqrt{\chi_2}}{\pi} \times \int_0^\infty \frac{\exp(-\mu^2 Fo) J_1(\mu) \left[J_0\left(\mu \sqrt{k \frac{r}{a}}\right) \psi(\mu) - Y_0\left(\mu \sqrt{k \frac{r}{a}}\right) \phi(\mu) \right] d\mu}{\mu [\phi^2(\mu) + \psi^2(\mu)]}, \quad (22)$$

где вспомогательные функции ϕ и ψ те же, что и в формуле (13).

Найдем приближенное простое выражение для этого интеграла, справедливое при $\mu \leq 1$ и соответственно $Fo \geq 1$. Если представить $J_1(\mu) \approx \mu/2$, а остальные функции выразить в виде степенных рядов по μ и выполнить интегрирование, то получим

$$\theta = \frac{\lambda_1}{4\lambda_2} \frac{1}{Fo} \exp\left(-\frac{r^2 k}{4a^2 Fo}\right). \quad (23)$$

С помощью этой формулы можно определить поперечное расстояние $r > a$, на котором θ принимает требуемое значение. Для примера сравним значение безразмерной температуры θ , определенной по формуле (23), с температурой поверхности изделия $\theta_{пов}$, определенной формулой (18). Определим расстояние r , на котором температура θ составляет 5 % от $\theta_{пов}$. Из выражений (18) и (23) следует

$$\frac{r}{a} = 2 \sqrt{\frac{Fo}{k}} \ln \left[\frac{20}{1 - \left(\frac{3}{8} + D\right) \frac{1}{Fo}} \right].$$

Применяя эту формулу к случаю нагрева стального цилиндра в цинке до температуры $\theta_{пов} = 0,05$, при $Fo = 3,7$, согласно выражению (18), получаем $r/a \geq 9,4$. Если температура расплава $T_1 = 450$ °С, а температура изделия на входе в него $T_0 = 20$ °С, то на выходе изделие имеет $T = 428,5$ °С. При этом на расстоянии $r/a = 9,4$ температура расплава понизилась всего на 1 °С. Учитывая, что вычисленное понижение температуры сравнимо с точностью ее измерения, считаем принятое в примере граничное значение (5 % от $\theta_{пов}$) допустимым. При создании многоручьевых установок нанесения металлических покрытий на проволоку из расплава расстояние между ручьями, по-видимому, должно быть не менее 10 диаметров проволоки.

Сравнение решений для моделей с граничными условиями третьего и четвертого рода. Установим, насколько чувствительны оценки, вы-

полненные с помощью выбранных моделей, к граничным условиям. Сравним решения, которые получаются при использовании граничных условий третьего и четвертого рода на примере нагрева стального цилиндра в расплаве цинка. Определим темп нагрева, который следует из формулы нестационарного нагрева цилиндра (8) при граничном условии третьего рода и из приближенной формулы (18), справедливой при граничном условии четвертого рода. По уравнению (18) требуется значение числа $Fo = 3,7$ для того, чтобы нагреть цилиндр до $\theta = 0,05$ и $Fo = 2,5$ для нагрева до $\theta = 0,07$. Чтобы получить приведенные выше параметры Fo и θ при конвективном нагреве в расплаве, согласно формуле (8), необходимы эффективные значения α , существенно меньшие, чем следует из критериальных уравнений. Чтобы нагрев длился так же долго, как он продолжается в отсутствие конвекции (при $Fo = 3,7$), необходим малый коэффициент теплоотдачи $\alpha = 2,0 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$. При несколько большем $\alpha = 2,63 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$ получаем из выражения (8) $Fo = 2,5$. Критериальные уравнения из работ [3, 4] дают более высокие значения α : около $7\text{—}15 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$ в зависимости от диаметра цилиндра (порядка $1\text{—}2 \text{ мм}$) и скорости его движения ($20\text{—}50 \text{ см}/\text{с}$) в цинке. Авторы работы [5] оценили коэффициент теплоотдачи от цинка к движущейся проволоке α около $8 \text{ Вт}/(\text{см}^2 \cdot \text{К})$, что согласуется с выводами критериальных уравнений. При этом значении α безразмерная температура θ , равная $0,05$, достигается при $Fo = 1,1$, а $0,07$ — при $Fo = 0,94$ согласно формуле (8). Из этих примеров видно, что темп нагрева движущихся изделий заметно выше, чем у покоящихся, температуру которых следует оценивать по формулам (17) и (18). Такой же вывод необходимо сделать о нагреве изделий плоской формы.

В таком случае для оценки времени нагрева покоящихся деталей, погруженных в нагревающую среду, по-видимому, целесообразно применять формулы (17)—(21). При этом такой способ оценки является единственным, если эта среда не допус-

кает возникновения конвекции. Например, это относится к случаю нагрева изделий, которые помещены в сыпучую среду. Если же среда жидкая и возможно возникновение естественной конвекции, то можно применять формулы (8) и (9), но для этого должны быть известны надежные критериальные соотношения для определения α . Можно воспользоваться также формулами (17)—(21), имея в виду, что они дают верхнюю оценку времени нагрева (а следовательно, и длины ванны расплава), так как конвективная составляющая теплоотдачи остается в этом случае неучтенной.

ВЫВОДЫ

1. Для оценки времени нагрева изделий в жидкой нагревающей среде следует пользоваться формулами, справедливыми для цилиндрических и плоских изделий и полученными при граничном условии третьего рода. Определенная таким образом величина является искомой при нанесении покрытий периодическим погружением изделий в расплав.

2. Если по какой-либо причине пользоваться коэффициентом теплоотдачи невозможно, то следует выполнить консервативную (несколько завышенную) оценку времени нагрева изделий. Для этого необходимо воспользоваться формулами нестационарного нагрева при граничном условии четвертого рода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Невровский В. А. О расчете нагрева длинномерных движущихся изделий в нагревателе конечной длины // Научные труды МАТИ. 2004. Вып. 7 (79). С. 112—116.
2. Карслоу Г., Егер Д. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1968. 487 с.
3. Жидкометаллические теплоносители / В. М. Боришанский, С. С. Кутателадзе, И. И. Новиков, О. С. Федынский. М.: Атомиздат, 1976. 353 с.
4. Чечеткин А. В. Применение расплавов солей и металлов в качестве высокотемпературных теплоносителей. М.: Атомиздат, 1975. 211 с.
5. Kormann M., Pexer J., Anderson E. High speed hot deeping of steel wire // Wire Journal. 1978. P. 52—58.
6. Лыков А. В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.

В. М. ЧЕРТОВ, инж., П. В. ПОТЕМКИН, инж.
АОЗТ "Компания "ЛЕМ"

Сжатый водород — оптимальное решение

На планету надвигается энергоэкологический кризис и необходимо предпринимать меры по его предотвращению. Какие меры? Что использовать вместо сокращающихся запасов нефти и газа? Как уменьшить вредные выбросы от ТЭЦ, заводов, автотранспорта?

Обратим внимание на работы, представляющие особый интерес и нацеливающие на становление водородной энергетики [1, 2], в частности перевод автотранспорта на водородное топливо. Некоторые относятся к этому как к неизбежному процессу и стараются осваивать производство всех частей, составляющих проблему. Выбросы автомобилей всегда должны быть экологически чистыми. Другие считают ближайшее и отдаленное будущее эрой массового прихода "гибридов" — автомашин с совмещенным бензиновым и электроприводом. Перемещение в городе — только на электричестве, за городом — на экономичном и экологически безопасном бензине. В этом случае нужно заниматься проблемой хранения и транспортирования водорода на борту автомобиля. Неизбежно возникает также проблема создания и выбора электрохимического генератора (ЭХГ) водорода для автомашин. Действительно, на подавляющем большинстве многочисленных форумов, конференций и заседаний в ходе прений об ЭХГ забывают о способе хранения водорода. Многие ратуют за хранение в связанном виде — в гидридах — безопасно, и не важно, что дорого и неэкономично: запас водорода по массе очень мал. Другие выступают за сжиженный водород: экономично, безопасно, и также не важно, что дорого (необходима суперизоляция бака, в котором должна сохраняться температура 20 К (–253 °С)). И те, и другие пугают: сжатый в баллоне водород — это бомба, которая может взорваться в любой момент. А если давление в баллоне поднять до 60—70 МПа ради экономичности: больше запас водорода и реже ездить на заправку, а заправочных станций еще нет — тогда нельзя и подходить к такому авто! Есть и такой заманчивый вариант — получение водорода прямо на борту, например, из метанола: экономично, привычно, без особых затрат и без переделки инфраструктуры. Правда, способ имеет два недостатка: в выбросе будут присутствовать оксиды углерода, а потребители, возможно, будут гибнуть от отравления при употреблении ядовитого спирта. Какой из предложенных способов выигрывает, предугадать трудно.

В последних российских публикациях, посвященных проблеме получения дешевого водорода

за счет использования солнечной, ветровой и атомной энергии [3, 4], отмечена важность решения задачи аккумулирования, хранения и транспортирования водорода.

Теперь вернемся к нашей проблеме. Один из руководителей ГК "Норильский никель" недавно признал, что важнейшая проблема хранения и транспортирования водорода остается нерешенной, хотя и не связал ее с автотранспортом, отдавая предпочтение "гибридам" [5]. Другой специалист этой же организации, ее представитель в Париже, весьма лестно отзывался о протестированном им автомобиле фирмы "Ниссан" с ЭХГ и мощностью двигателя 120 л. с., работающем на сжатом водороде (в баллонах под давлением 70 МПа!) [6]. В феврале 2007 г. на ВВЦ из трех представленных российских автомобилей, использующих водород (от НАМИ — "Бычок" и ВАЗ-2114, от МЭИ и Национальной ассоциации водородной энергетики (НАВЭ) — "Газель" ГАЗ 33104 "Валдай" [7]), первый был полностью водородным и снабжен баллонами под давлением 40 МПа производства АОЗТ "ЛЕМ". Ранее разработанные РКК "Энергия" в содружестве с УЭХК и ОАО "АвтоВАЗ" водородные автомобили "АНТЭЛ-1" и "АНТЭЛ-2" также были снабжены тремя баллонами: первый — объемом 60 л под давлением 25 МПа, второй — на 30 л при давлении 30 МПа. Благодаря этому пробег второй машины с двигателем мощностью 90 кВт достиг 350 км на одной заправке баллонов водородом. При некотором изменении процесса время заправки баллона водородом можно сократить с 2 ч до 10 мин [8].

Таким образом, реально Россия практически не имеет других машин на водороде, кроме как при баллонном хранении. И это, несмотря на то, что разработке способов гидридного хранения посвящено множество работ. Как же обстоят дела на российском рынке водородных баллонов и какие предприятия осваивают этот рынок, признанный перспективным многими фирмами развитых стран? Стальные баллоны Первоуральского новотрубного завода вместимостью 0,4—50 л с давлением 19,6 МПа (ГОСТ 949—73), а также 80—500 л с давлением 24,5 МПа для применения на автотранспорте непригодны: неэкономичны, тяжелы и громоздки. Предлагаемые НАВЭ стальные баки производства НИИХиммаш с давлением 25 МПа (запланированные для заправки водородом на проектируемой первой заправочной станции [9]), еще недостаточно экономичны: на одной заправке можно проехать только 150 км. Предложенный рядом авторов проект

облегченного композитного баллона с давлением 70 МПа и высокопрочным лейнером из коррозионно-стойкой стали, легированной азотом [10], нуждается в серьезной корректировке. В России отсутствуют заводы, способные выплавить такую сталь, и предприятия, способные раскатать заготовку из такой стали с получением высокой прочности в процессе раскатки [11]. Сварка такого лейнера из трех частей абсолютно неприемлема: уже при несколько повышенном давлении водорода происходит, как показали испытания в АОЗТ "ЛЕМ", разрушение баллонов по сварным швам (в зоне влияния). Небольшие, вместимостью 6 л, с давлением 70 МПа экспериментальные баллоны, пригодные для исследований, появились в Центре им. Келдыша, изготовленные в ЦНИИСМ [12]. В МАИ в содружестве с РКК "Энергия" и ОАО "Сплав" изготовлены и испытаны баллоны на 10 л, массой 2,5 кг, с давлением 30 МПа и коэффициентом запаса 2,6 (правда, пока для воздуха). При этом отработана одна из важнейших характеристик композитного баллона — оптимальное соотношение толщины лейнера из коррозионно-стойкой стали и силовой оболочки из органопластика, обеспечившее сохранение целостности лейнера при разрушении оболочки баллона при давлении 76 МПа [13]. Способ заправки баллонов более высокого давления проблематичен (об этом будет сказано ниже).

Другой важной составляющей реального рынка водородных баллонов являются разработки АОЗТ "ЛЕМ" [14]. Композиционные баллоны для водорода разрабатывались (совместно с ОАО "Поиск", Санкт-Петербург) в течение 17 лет. От малолитражных — на 4 л и давление 32 МПа до среднего объема — на 30 л и большого — на 1000—2500 л и 40 МПа (баллон БГ-2500-40) — таков диапазон взрывобезопасных сертифицированных водородных баллонов АОЗТ "ЛЕМ". Одна из перспективных разработок — композиционный баллон для РКК "Энергия" и ОАО "АвтоВАЗ" вместимостью 30 л, давлением 40 МПа, массой 12 кг. Другая разработка — переданный НАМИ комплект баллонов вместимостью по 66 л, с рабочим давлением 40 МПа, массой каждого 68 кг, длиной 1400 и диаметром 365 мм. Силовая оболочка выполнена из высоко модульного стеклоровинга, лейнер, толщиной 1 мм, когерентно с силовой оболочкой воспринимающий нагрузку, — из коррозионно-стойкой аустенитной стали. Впервые разработана вся запорная и газоредуцирующая аппаратура: запорные и проходные вентили, предохранительные клапаны, заправочное устройство с дренажем, выходом на манометр и разрывным клапаном, комбинированный понижающий редуктор 40—5—2 МПа, арматура для монтажа трубопроводов.

К наиболее "продвинутым" проектам АОЗТ "ЛЕМ" относится выполненная по заказу МАИ опыт-

но-конструкторская разработка баллона высокого давления для хранения и транспортирования газообразного водорода (шифр БМА-60-70). Рабочее давление в баллоне 70 МПа, разрушающее давление 182 МПа, вместимость 60 л при размерах, близких к размерам баллона, изготовленного для НАМИ, масса порожнего баллона не более 50 кг, количество повторных заправок — до 1000. Баллон соответствует всем требованиям, сертифицирован, гарантийный срок — 1 год, срок хранения — 2 года, пригоден для серийного производства. Проект начнет осуществляться с началом финансирования.

Разработкой баллона для хранения водорода занимается ИЭС им. Е. О. Патона [15]. От изготовления лейнера из алюминия, имеющего свои преимущества, пришлось отказаться, так как тонкий лейнер, используемый как оправка при намотке силовой оболочки, при этом недопустимо деформируется. Увеличение толщины лейнера сводит к нулю выигрыш по массе и габаритным размерам. Применение же упрочняющихся сплавов нецелесообразно из-за больших остаточных напряжений, способствующих разрушению. Кроме того, из-за отсутствия на Украине водородных заправочных станций нерационально проектировать баллоны на давление более 40 МПа.

Из ряда зарубежных автоконцернов единственный — БМВ (Германия) — освоил сжиженный водород в качестве трансформируемого источника энергии и добился впечатляющих успехов в строительстве машин разного уровня. Водород на борту автомобиля переводится в газообразное состояние и сжигается в мощном потоке воздуха в двигателе внутреннего сгорания, создавая почти чистый выброс (только с оксидами азота). Остальные компании предпочли сжатый водород, при этом электроэнергия производится при соединении кислорода из баллонов или из воздуха с водородом в электрохимических генераторах (топливных элементах).

Ниже приведены иностранные водородные автомобили, в которых водород хранится в сжатом виде [16, 17]. Компания "Хонда" в модели Honda FCX-V3 применила для хранения водорода вместо гидридной системы углеродный композитный баллон вместимостью 150 л с давлением 30 МПа, увеличив количество запасенного топлива в 1,5 раза и сократив время заправки с 20 до 5 мин. Эта компания уже сдает в аренду в Лос-Анджелесе (США) легкой автомобиль с доплатой арендатору 500 долл в месяц и заправкой баллонов водородом на открытой там же станции.

В автомобиле P2000 FCV компании "Форд" масса сжатого водорода, находящегося в баллоне при повышенном давлении, равна 1,4 кг, и этого достаточно для пробега в 160 км. В аналогичном виде находится водород и в модели Ford Focus FCV. Компания "Ниссан" в модели Xterra применила для

хранения сжатого водорода цельнотянутый тонкостенный алюминиевый баллон (интересны марка сплава и технология изготовления), упрочненный углеродным волокном. Компания "Хёндэ" в модели Santa Fe FCEV хранит водород в баллоне вместимостью 72 л при давлении 35 МПа.

В модели Ну-wire компании "Дженерал Моторс" при таком же давлении водород хранится в трех баках длиной 1160 мм и диаметром 240 мм. Концерн "Даймлер Крайслер" построил для испытания в городах Европы 30 автобусов Mercedes-Benz Citaro с водородным питанием батареи топливных элементов мощностью 200 кВт от шести баллонов с давлением 35 МПа, расположенных на крыше. На выставке водородных автомобилей в Иокогаме в 2004 г. были представлены 10 моделей, в том числе автобус, ряда японских фирм, а также фирм "Дженерал Моторс" и "Даймлер Крайслер" (значительная часть из них — с хранением водорода в сжатом состоянии). Следует отметить поставку вооруженным силам США водородного пикапа Chevrolet Silverado фирмы "Дженерал Моторс" [18], в котором в качестве силовой установки применены два классических водородных двигателя — батареи топливных элементов по 94 кВт, питающие электромотор мощностью 188 кВт, что на 20 % меньше, чем у стандартного дизельного образца пикапа. Сжатый водород хранится в трех баллонах, его запаса хватает на пробег 200 км при скорости до 150 км/ч.

Число фирм, отдающих предпочтение хранению водорода при повышенном давлении, увеличивается ("Ниссан" в перспективе применит уже давление 100 МПа). Проникновение же водорода сквозь коррозионно-стойкую сталь невелико (пропорционально корню квадратному из давления и обратно пропорционально толщине лайнера [19], которую стремятся уменьшить). Повышение давления водорода в композитных автомобильных баллонах свыше 60—70 МПа вызывает опасения относительно герметичности тонкостенных стальных лайнеров. По имеющимся данным, проникновение водорода сквозь коррозионно-стойкую, метастабильную, с неустойчивой структурой сталь и взаимодействие с ней могут вызвать нежелательные последствия (охрупчивание). Немаловажен и такой факт: высокое содержание хрома препятствует нанесению тонких металлических защитных (барьерных для водорода) покрытий на коррозионно-стойкую сталь, и содержание хрома в ней придется снижать, без снижения ее коррозионной стойкости. Для предотвращения этих опасных явлений, возможно, потребуются дополнительные исследования [22].

Заключение

Инженерная проблема при разработке водородного автомобиля заключается в выборе топлива. Водород вполне может использоваться и в сжатом

состоянии. Этот способ имеет свои определенные технологические преимущества, но требует разработки методов заправки.

Мнение ряда специалистов (зачастую — необъективное) о большой взрывоопасности и малой экономичности такого способа опровергается бурным развитием техники.

На российском рынке автокомпонентов для хранения и транспортирования водорода в сжатом состоянии уже имеются по крайней мере два поставщика.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кузык Б. Н., Яковец Ю. В. Россия: стратегия перехода к водородной энергетике. М.: Институт экономических стратегий, 2007. 400 с.
2. Коровин Н. В. Топливные элементы и электрохимические энергоустановки. М.: МЭИ, 2005. 279 с.
3. Пивнюк В. А. Солнечно-водородная энергетика: состояние и перспективы // Высокие технологии XXI века. М.: Российский фонд высоких технологий, 2007. С. 172—177.
4. Некоторые возможности атомно-водородной энергетики / Н. М. Троценко, А. Ф. Чабак, В. Н. Косяков и др. // Альтернативная энергетика и экология. 2007. № 3 (47). С. 91—94.
5. Пивнюк В. А. Состояние и перспективы научных исследований в области водородной энергетики // Водородная энергетика как один из инновационных приоритетов развития России на период до 2050 г. М.: МИРЭА, 2007. С. 3.
6. Чародеев Г. Представитель "Норникеля" протестировал водородный автомобиль // Эквивалент — журнал в журнале. Драгоценные металлы. Драгоценные камни. 2007. № 3 (159). С. 163—164.
7. Водородные автомобили на ВВЦ / Эквивалент — журнал в журнале. Драгоценные металлы. Драгоценные камни. 2007. № 3 (159). С. 165—166.
8. Мирзоев Г. Автомобиль на топливных элементах // Наука и жизнь. 2003. № 8. С. 8—11.
9. Раменский А. Ю. Проект первой российской водородной заправочной станции // Водородная энергетика как один из инновационных приоритетов развития России на период до 2050 г. М.: МИРЭА, 2007. С. 11.
10. Экономичность и безопасность в одном баллоне / В. М. Чертов, А. М. Глейзер, О. В. Татарников и др. // АЭЭ. 2004. N 10. С. 5—7.
11. Фетисов Г. П., Чертов В. М. Метод выбора состава и технологии изготовления высокопрочной стали для сосудов хранения и транспортирования водорода // Водородные технологии для производства энергии. М.: Роснаука, 2006. С. 123—124.
12. Десятов А. В. Перспективы развития электрохимических энергоустановок для транспорта // Альтернативные источники энергии для больших городов. М.: Прима-пресс, 2006. С. 75—76.
13. Воробей В. В., Демичев В. И., Тарасюк В. И. Разработка и экспериментальное исследование сверхлегких металлокомпозиционных баллонов // Динамические и технологические проблемы. М.: МАИ, 2007. С. 63—64.
14. Номенклатура изделий АОЗТ Компании "ЛЕМ". 2006.
15. Мазур А. А. Разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области альтернативной энергетики // Высокие технологии XXI века. М.: Российский фонд высоких технологий. 2007. С. 224—225.
16. Гольцова Л. Ф. 15-я Международная конференция по водородной энергетике. Иокогама. 2004. www.energetika.net.ru
17. Орлов Д. Теплота спасет мир // Вокруг света. 2003. www.vorkugsveta.ru
18. Водородный "Шевроле" на службе в американских вооруженных силах // АЭЭ. 2005. № 4. Vol. 24. С. 82—83.
19. Гельд П. В., Рябов П. А. Водород в металлах и сплавах. М.: Металлургия, 1974. С. 198—201.
20. Чертов В. М. О барьерных покрытиях нержавеющей стали // Совершенствование технологии гальванических покрытий. Киров: ВятГУ, 2006. С. 111—112.

О. Е. КАПУСТИН, д-р техн. наук,
(РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина),
Е. М. ВЫШЕМИРСКИЙ, инж.
(ОАО "Газпром")

Методология аттестации и сертификации оборудования для газовой и плазменной резки, применяемого при ремонтных работах на газотранспортных предприятиях

Газовая и плазменная резка металла являются основными технологическими процессами, применяемыми при ремонте оборудования и трубопроводов на газотранспортных объектах. В группу нефтегазодобывающего оборудования (НГДО) входят промысловые и магистральные газопроводы и конденсатопроводы, трубопроводы для транспортировки товарной продукции, импульсного, топливного и пускового газа в пределах установок комплексной подготовки газа, компрессорных станций, дожимных компрессорных станций, станций подземного хранения газа, газораспределительных станций, узлов замера расхода газа и пунктов редуцирования газа.

Обеспечение безопасности и качества выполнения работ по резке и последующей сварке на газотранспортных предприятиях может быть реализовано только при неуклонном учете особенностей климатических и гидрологических условий, в которых они производятся. Так как добываемый, транспортируемый газ и газы, используемые при газоплазменной обработке металлов, являются взрывоопасными, а процессы термической и плазменной резки сопровождаются опасными и вредными факторами (повышенной загазованностью воздуха рабочей зоны, высокочастотным шумом, повышенными уровнями инфракрасной радиации и яркости света и др.), применяемое оборудование для выполнения резки на предприятиях (объектах) НГДО, особенно для работ в полевых условиях, должно быть надежным и безопасным при обязательном его соответствии заданным техническим параметрам. Выполнение работ должно осуществ-

ляться только обученным и аттестованным персоналом. Обучение и аттестация сварщиков, резчиков и руководящего персонала осуществляются в аттестационных центрах, выдающих соответствующие аттестационные удостоверения, а выбор и применение необходимого оборудования для производства газоплазменных работ, в том числе работ по резке, должны производиться с учетом следующих требований.

1. Разработка технической документации на оборудование для резки должна осуществляться только в специализированной организации, имеющей опыт разработки необходимых стенок для испытаний опытных образцов на соответствие заданным техническим требованиям, аттестованными специалистами по промышленной безопасности и конкретно по видам работ.

2. Оборудование по резке должно быть сертифицировано в органе по сертификации, в область аккредитации которого это оборудование включено. Сертификация проводится с целью подтверждения соответствия изделий действующим стандартам и нормативным документам, гарантирующим безопасность его использования.

3. На оборудование по резке должно быть получено свидетельство НАКС об аттестации оборудования в соответствии с требованиями соответствующего руководящего документа (РД), выданное на основании протокола аттестационных испытаний оборудования в АЦ или АП, подтверждающих его соответствие паспортным данным или техническим параметрам.

4. При использовании оборудования для резки на объектах ОАО

"Газпром", согласно СТО ГАЗПРОМ 2-3.5-046—2006 головной экспертной организации (ВНИИАВТОГЕНМАШ), могут быть проведены квалификационные испытания оборудования, результаты которых оформляются актом. Испытания проводятся с целью подтверждения соответствия оборудования утвержденным в ОАО "Газпром" техническим требованиям.

5. По заявке потребителя производителем оборудования могут быть оформлены разрешения Ростехнадзора РФ на применение технических устройств на опасных производственных объектах согласно РД 03-485-02 и РД 03-10—2004.

Приведенная оценка приемлемости оборудования по резке на газотранспортных предприятиях позволяет отобрать качественное и безопасное оборудование¹.

Основные виды применяемого при ремонте трубопроводов оборудования для газовой и плазменной резки представлены ниже.

Газовые резаки

В табл. 1 приведены основные технические характеристики ручных инжекторных резаков, применяемых при ремонте трубопроводов, использующих в качестве горючего газа пропан (рис. 1).

В настоящее время широко применяются трехтрубчатые газовые резаки с внутрисопловым смешением (рис. 2). Они отличаются от инжекторных резаков возможностью работы как на ацетилене, так

¹ Оборудование для сварочно-монтажных работ при ремонте магистральных газопроводов / В. В. Салюков, Е. М. Вышемировский, О. Е. Капустин и др. М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2007.

и пропане (при замене мундштука) и большей устойчивостью к "обратному удару". Технические характеристики различных резаков приведены в табл. 2.

Ручные газовые резаки также оснащаются вспомогательными устройствами: опорными роликами, циркулями или приспособлением для резки труб (рис. 3).

Машины термической резки (МТР) труб

Предназначены для механизированной газовой (ацетилен, пропан) и плазменной резки углеродистых и низколегированных сталей (толщиной от 5 до 160 мм) в полевых условиях при ремонте магистральных трубопроводов и на трубо сварочных базах при температуре окружающей среды от 40 до -40 °С. МТР подразделяют на машины общего назначения и специализированные. Специализированные машины предназначены для выполнения какой-либо одной специфической операции: обрезки труб, вырезки фланцев, отверстий в вертикальной и наклонной плоскостях и др. Кислородная резка производится с использованием в качестве горючего газа ацетилена или его заменителей (пропан-бутана). МТР оснащены машинными резаками типа РМ-3, "Салют ПН" и др. (табл. 3) и устойчиво работают при давлении ацетилена на входе 0,01 МПа и давлении газов-заменителей 0,03 МПа.

Переносные машины для кислородной резки

По сравнению с ручной резкой переносные машины обеспечивают более высокое качество поверхности реза, значительно ускоряют процесс и освобождают рабочего от тяжелого ручного труда. Такие МТР имеют малую массу, просты по устройству и удобны в эксплуатации. Газопитание переносных машин, эксплуатируемых на предприятиях, трассовых условиях при ремонте или монтаже, может осуществляться от передвижных постов.

Машины типа "Орбита-БМ", широко применяемые при ремонте трубопроводов (рис. 4), выполняют резку перпендикулярно оси трубы или под различными углами (для снятия фасок). Система крепления

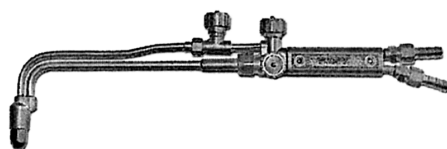


Рис. 1. Резак "Маяк"

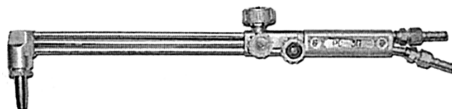


Рис. 2. Резак пропановый внутрисоплового смешения "Факел" (РС-3П)

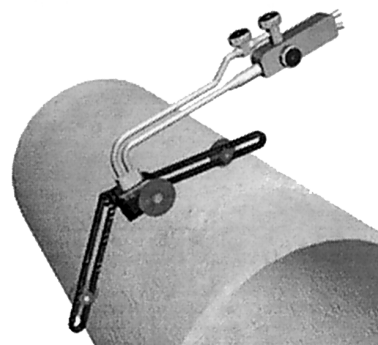


Рис. 3. Приспособление для резки труб

Таблица 1

Изделие	Номер мундштука		Толщина разрезаемой стали, мм	Длина резака, мм, не более	Масса, кг	Производитель
	внутреннего	наружного				
РЗП-02	1, 2, 3, 4, 5	1, 2	3—200	530	1,3	"Автоген-М"
Р1-01П	0, 1, 2	2	3—50	500	0,96	БАМЗ
Р2-01	1, 2, 3, 4	1, 2	3—200	500	1,3	БАМЗ
"Маяк 2-2Р"	1, 2, 3, 4	1	3—100	580	1,3	ЗАО "Мидасот-Т"
"Маяк 2-01"	1, 2, 3, 4, 5, 6	1, 2	3—300	580	1,3	ЗАО "Мидасот-Т"
PROFI Cut L 8707-A/PMY			3—300	460	0,9	Германия

Таблица 2

Изделие	Номер мундштука	Толщина разрезаемой стали, мм	Длина резака, мм, не более	Масса, кг, не более	Производитель
"Факел" (РСЗП)	1П	5—20	590	1,20	ЗАО "Мидасот-Т"
	2П	12—60			
	3П	40—110			
"Салют" (РС5П)	4	50—100	550	1,30	ВНИИАВТОГЕНМАШ
	5	100—200			
Р2-07	1	3—30	585	1,05	БАМЗ
	2	10—50			
	3	30—100			
Starcat-8605 AIPMY	1	3—20	480	1,50	Messer, Германия
	2	10—50			
	3	25—100			

Таблица 3

Изделие	Номер мундштука		Толщина разрезаемой стали, мм	Длина резака, мм, не более	Масса, кг	Производитель
	внутреннего	наружного				
РМ-3	1	2, 3	5—300	332	0,92	ЗАО "Мидасот-Т"
"Салют ПН"	1	ОП, 1П, 2П	3—500	212	0,70	ВНИИАВТОГЕНМАШ

и перемещения машины по гибкому кольцевому поясу (шаблону) гарантирует точное совпадение начала и конца резов. Выпускаются в комплектациях как для газовой, так и плазменной резки труб.

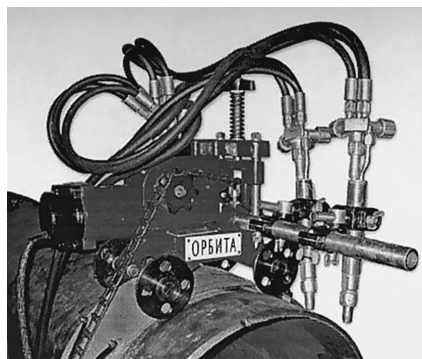


Рис. 4. МТР "Орбита-БМ"

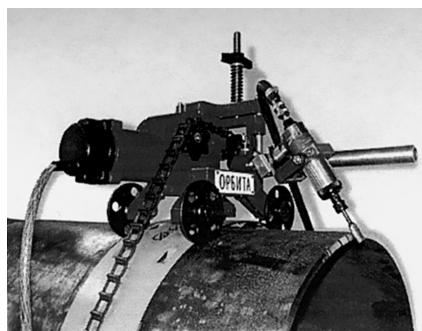


Рис. 5. МТР "Орбита" с устройством подготовки кромок

Техническая характеристика МТР "Орбита-БМ"

Размеры разрезаемых, труб, мм:

диаметр по I варианту . . .	530, 720, 820, 1—20, 1220, 1420
толщина стенок	5—75
Количество резаков	2
Скорость перемещения резака, мм/мин	100—1200
Несовпадения начала и конца реза, мм, не более . .	1
Отклонение контура реза от плоскости, мм (при диаметре до 1 м/свыше 1 м) . .	1 / 2
Максимальный расход (кислород/пропан-бутан/ацетилен), м ³ /ч	12/0,4/0,55
Рабочее давление, МПа:	
кислорода	1,2
ацетилена	0,01—0,05
пропан-бутана	0,01—0,045
Подводимое напряжение, В (к блоку питания к машине).	220—230
Потребляемая мощность, Вт, не более	110
Габаритные размеры ходовой части с блоком резки, мм	344 × 518 × 447
Масса комплекта, кг, не более	105

МТР типа "Орбита-БМ" может оснащаться специальным устройством для снятия слоя металла после кислородной или плазменной резки перед сваркой (рис. 5), что позволяет исключить обработку кромок шлифмашинами вручную.

СТО "Газпром 2-3.5-046—2006", определяющий порядок экспертизы технических условий на оборудование и материалы, аттестации технологии и оценки готовности организаций к выполнению работ по диагностике и ремонту объектов транспорта газа ОАО "Газпром", устанавливает номенклатуру (виды) оборудования, материалов, технологий и утверждает перечни головных экспертных организаций по каждому

виду оборудования, материалов и технологий. Головной экспертной организацией по оборудованию и технологиям резки трубопроводов является МЦ "ВНИИАВТОГЕНМАШ". Стандарт ОАО "Газпром" введен в действие с 24.07.2006 г.

Учитывая, что многочисленные объекты ОАО "Газпром" расположены по всей территории России от северных границ до западных и южных, а также при реализации технологий резки и сварки применяется более 6 тыс. единиц сварочного оборудования, участвуют и содействуют несколько тысяч сварщиков, резчиков и обслуживающего персонала, добываемый, транспортируемый, потребляемый газ и га-

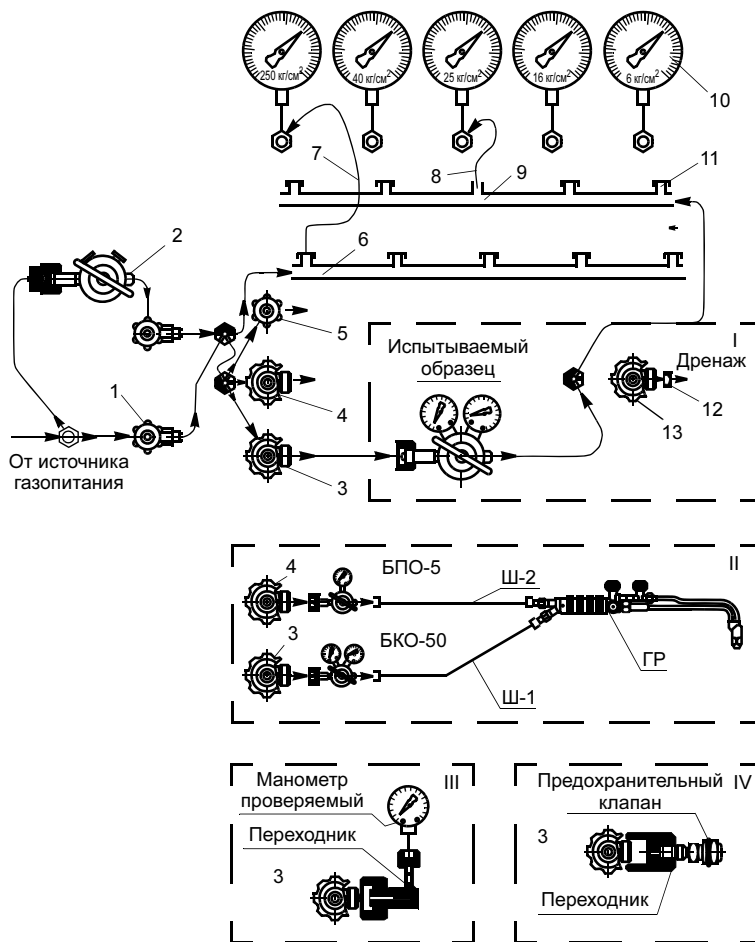


Рис. 6. Принципиальная схема универсального стенда для испытания газовых регуляторов (I); горелок и резаков (II); поверки манометров (III); регулирования предохранительных клапанов (IV) (Ш1 и Ш2 — рукава газовые; ГР — горелка и резак; БПО-5, БКО-50 — редукторы): 1 — вентиль КС7104; 2 — редуктор высокого давления РВ-90; 3—5 — вентили для присоединения кислородного, пропанового (водородного) и ацетиленового редукторов соответственно; 6, 9 — коллекторы манометров входного (высокого) и выходного (рабочего) давления соответственно; 7 — соединительная трубка коллектора входного давления; 8 — соединительная трубка коллектора выходного (рабочего) давления; 9; 10 — манометры; 11 — заглушки коллектора входного и рабочего давления; 12 — комплект расходных шайб; 13 — вентиль дренажный

зы, используемые при газопламенной обработке металлов, являющиеся взрывоопасными, вопросы обеспечения безопасности при производстве газорезательных и газосварочных работ становятся наиболее важными, имеющими большое социальное значение, влияющими на качество и надежность указанных промышленных объектов.

Ниже приведены работы по обеспечению качества газорезательных и газосварочных работ и повышению безопасности при их выполнении на объектах ОАО "Газпром", проводимые постоянно:

- обучение и аттестация сварщиков, резчиков и руководящего персонала согласно Правилам, утвержденным Ростехнадзором и введенным в действие с 15.01.2000 г.;

- сертификация сварочного оборудования, подлежащего обязательной сертификации, но еще не сертифицированного;

- учет, анализ и своевременная замена разнотипного и устаревшего оборудования на более совершенное, отвечающее установленным нормам и требованиям ОАО "Газпром";

- аттестация оборудования, материалов и технологий согласно требованиям САСв (системы аттестации сварочного производства) НАКС;

- разработка и внедрение стандартов предприятия, в том числе инструкций по разделительной резке, газовой сварке и др.;

- периодический и входной контроль оборудования и материалов перед передачей их на рабочие участки.

Среди дочерних обществ ОАО "Газпром", осуществляющих плановые работы по ремонту магистральных газопроводов, в том числе по газовой резке и сварке, одним из первых было ООО "Тюментрансгаз", уже в 2004 г. установившее на своих объектах восемь специальных стендов, спроектированных и изготовленных МЦ "ВНИИАВТОГЕНМАШ", для испытаний газовых баллонных редукторов, резаков, горелок, предохранительных клапанов и поверки манометров.

Применение стендов (рис. 6) позволяет выявить возможные дефекты новых горелок, резаков, редукторов, клапанов и проводить их периодические испытания согласно установленным графикам.

В 2006 г. АЦСО-54 МЦ "ВНИИАВТОГЕНМАШ" проведены аттестационные испытания оборудования для газовой резки и сварки ООО "Тюментрансгаз". Посты (рис. 7) укомплектованы пламегасящими защитными устройствами типа ПГИ (производитель ЗАО "Мидасот-Г"). В состав поста газовой резки входят баллоны пропановый 3-50-3.0-К (ГОСТ 15860) 1 и кислородный 40-150У (ГОСТ 949) 2, редукторы пропановый БПО-5 (ГОСТ 13861) 3 и кислородный БКО-50-4 (ГОСТ 13861) 4, рукава (L = 30 м) пропановый I-6.3-6.3ХЛ (ГОСТ 9356) 5 и кислородный III-6.3-20ХЛ (ГОСТ 9356) 6, пламегасители пропановый ПГИ-1П (ГОСТ Р 50402—92) 7 и кислородный ПГИ-1К (ГОСТ Р 50402—92) 8, резак инжекторный газовый Р1-01П (ГОСТ 1077) 9.

Испытания основного оборудования постов, к которому отнесены резаки пяти различных типов, проводили по следующей программе: три этапа специальных испытаний и практические испытания, включающие резку образцов с последующей механической обработкой кромок и сваркой. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Испытания показали соответствие всех технических параметров установленным требованиям, по результатам которых проводилась аттестация и получены свидетельства НАКСа об аттестации оборудования постов. Очевидна экономическая и практическая целесообразность использования при газопламенной обработке трубопроводов того же газа, который транспортируется по ним, а именно природного. Возможны несколько вариантов проектных решений: отводка газа непосредственно от газопровода и наполнение баллонов природным газом (метаном) с доставкой последних на оптимальные расстояния с точки зрения затрат на их перевозку. Природный газ, особенно при резке, может заменить ацетилен, пропан и любое жидкое горючее.

Разработка комплектов специальной аппаратуры, работающей на метане, для предприятий НГДО актуальна, вполне выполнима и включена в проект работ НИОКР ООО "Газпром" на 2008 г.

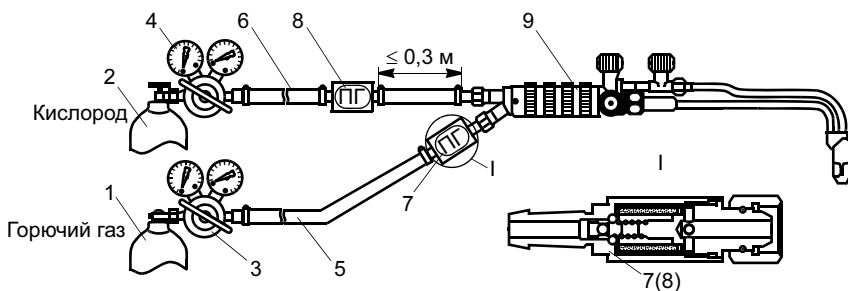


Рис. 7. Устройство поста газовой резки

Таблица 4

Параметр ¹	Относительное значение ² проверяемых параметров, % к номинальному значению для резаков				
	Р1-01П	"Маяк-2-01"	Р2-01П	РЗП	"Огонь-3"
Расход газа, м ³ /ч, не более: 2,5—33,2 кислорода 0,30—0,73 пропан-бутана	95,5—100 96,7—98,8	96,4—97,8 96,5—100,0	96,5—97,8 95,4—100	96,5—98,7 96,5—100	95,8—98,8 94,7—99,2
Давление на входе в резак, МПа, не более: 0,25—1,00 кислорода 0,001—0,150 пропан-бутана	95,7—100 94,8—99,1	96,5—98,1 96,3—100	95,4—100 96,3—97,8	96,4—98,7 96,5—99,1	95,6—99,2 65,4—100
Толщина разрезаемого металла 3—300 мм	100				

¹ Для резаков с внутренними мундштуками № 0—6.
² Для резаков с внутренними мундштуками согласно паспортной комплектности.

Ю. В. МИХАЛИЦЫНА, канд. техн. наук,
Университет Айштата-Ингольштадта (Германия),
О. В. РЯБКОВА, канд. техн. наук,
(Главное следственное управление при ГУВД Свердловской обл.)

Формы организации труда в современном автомобилестроении

Мировой рынок легковых автомобилей¹ уже несколько лет находится в стадии стагнации. Все это происходит на фоне сокращения производства и увеличения складских запасов готовой продукции. По мнению Керна и Шумана, такая ситуация приводит к растущему недовольству в среде работников автомобильных концернов, которым приходится так или иначе опробовать новые рабочие места, средства производства и т. д. [1]. В подобных условиях большие объемы производства для предприятий возможны только при поддержании все ускоряющегося темпа конкуренции. Реакция автомобильных концернов сводится, как правило, к повышению конкурентоспособности через снижение внутренних расходов [2], зачастую в области организации труда. Именно поэтому представляется весьма актуальным рассмотрение вопросов организации труда, особенно его форм, на автосборочных предприятиях отрасли. При этом особое внимание будет уделено тому, как изменяются формы организации труда в практике различных автопроизводителей.

Формы организации труда имеют место при организации рабочего места, рабочего времени, процес-

сов труда и их связи с общими процессами, проходящими на предприятии. Современные формы организации труда в автомобилестроении тесно связаны с гуманизацией отношений между работником и работодателем. В настоящее время есть несколько направлений гуманизации труда (рис. 1) [3]. Все они, как правило, соответствуют современным представлениям общества о труде и подкреплены соответствующей законодательной базой. Например, для снижения монотонности труда, что особенно характерно для работы на конвейере, в рамках бригады работник может выполнять различные операции, меняясь со своими коллегами. Также предусмотрены расширение и углубление сфер деятельности. В первом случае работник может постепенно заменять простые операции на конвейере более сложными, во втором — влиять на принятие управленческих решений как в сфере производства, так и в сфере сбыта, выполнять определенные контрольные функции (особенно характерно для шведской модели производства). Работники получают больше заданий, соотносимых со степенью их компетентности и сферой ответственности. Исходя из этого, увеличивается область деятельности работника и одновременно снижается монотонность труда [3]. Особое отношение и к рабочему времени. За вынужденную переработку предусмотрена повышенная заработная плата, а за работу на конвейере в ночную смену полагаются выплаты, например в Германии в полтора раза больше обычной ставки. Также совре-

¹ Так, автомобильная промышленность является ключевой отраслью в Германии. Для обеспечения экономического роста необходимо сохранение рабочих мест. Только в самой отрасли занято более 770 тыс. человек, а в сопутствующих отраслях — 1,45 млн человек [8].

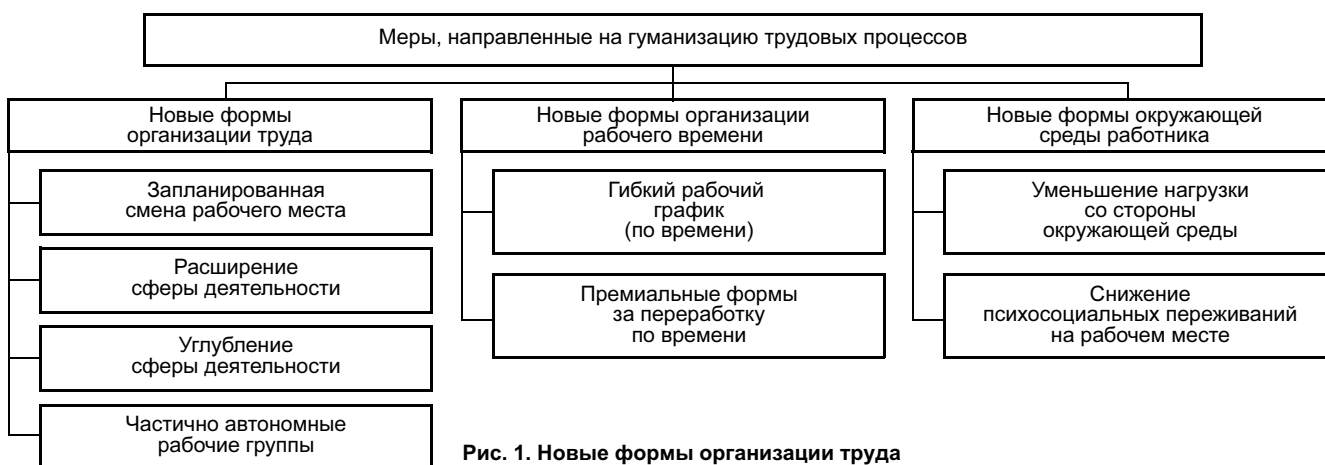


Рис. 1. Новые формы организации труда

менные автомобилестроители уделяют особое внимание социальной адаптации человека на его рабочем месте, повышенные требования предъявляются к наиболее гармоничному подбору людей в бригадах. Причем в последнее время появилась тенденция предпочтения работников с заниженными лидерскими качествами. Потенциальный "лидер", по мнению западных кадровиков, будет так или иначе мешать остальным выполнять уже заранее спланированную и строго определенную работу. Все это лишний раз подчеркивает особое место гуманизации процессов труда и, соответственно, наиболее гуманных методов в современном автомобилестроении [2, 4—7].

Одним из ярких примеров современных концепций организации труда в современной промышленности является компания Lean Produktion (Германия). В ней присутствует гармоничное соотношение внешней среды и организации труда на самом предприятии, что приводит к определенному оптимуму, позволяющему повысить конкурентоспособность предприятия [9]. Lean Produktion в автомобильной промышленности в области организации труда активно использует элементы тэйлоризма-фордизма, такие как конвейер, такт работы, стандартизацию труда и рабочие планы. У тойотизма были заимствованы работа в группах, кайцен, т. е. постоянное улучшение, регулярная смена рабочего места, что активно управляется через Just-in-Time и систему канбан [9]. В центре всех производственных отношений находится работник. Весь объем работы поделен на несколько частей, которые возможно выполнить, используя все ранее перечисленные формы организации труда. Такие классические вторичные функции (относительно процесса труда), как обеспечение качества, частичное планирование и т. д., интегрируются в общий объем работы каждого [10].

Несмотря на кажущуюся успешность использования принципов Lean Produktion, можно уже с уверенностью констатировать начало конца так называемых "гибких предприятий" в автомобильной отрасли. Основанием для этого являются постоянные переработки (большее использование рабочего времени, чем запланировано), недостаточно соответствующая такому положению заработная плата (например на заводах японских корпораций в третьих странах). Поэтому часто возникают проблемы с набором персонала и проблемы с все растущей степенью недовольства работников условиями труда [9, 11]. Попробуем разобраться в этом.

Принципы работы Lean Produktion включают в себя конкретную организацию труда на различных уровнях предприятия. В качестве основополагающих принципов, которые так или иначе затрагивают сферу труда, Бёзеберг называет собственную ответственность, работу в группах, стандартизацию и регулярные улучшения собственного процесса труда [12]. Ключевыми моментами Lean Produktion является самостоятельность работника, чувство собственной ответственности, способность самостоятельно оценить уровень качества выполняемой работы. Причем чувство собственной от-

ветственности раскрывается через повышение мотивации и готовности увеличить производительность своего труда, через полное соответствие целей и методов работника целям самого предприятия, через возможное использование ранее не задействованного потенциала работника (например его уровня образования) [12]. С помощью стандартизации всех повторяющихся процессов, похожих заданий возможно достижение профессиональной гибкости работника. Однако все это возможно при желании самого работника участвовать в подобных процессах.

Вернемся к вопросу гуманизации труда. Крейкебаум и Херберт отмечают, что гуманизация труда в первую очередь связана с приведением в соответствие потенциальных возможностей работника и его представлений о труде. Сюда же можно отнести возможность карьерного роста, уменьшение контроля за процессом труда извне через применение контроля самим работником, уменьшение доли изолированной работы, увеличение требований, предъявляемых к труду, улучшение мотивации труда [3]. Как правило, собственное представление о труде работник, задействованный в группе, передает через представителя. Некоторые западные ученые пришли к выводу, что удовлетворенность содержанием и организацией труда или свободное время по причине меньшей загруженности гораздо важнее размера заработной платы для современного человека [6]. С этим можно согласиться, если рассматривать труд в контексте современных зарубежных социальных и экономических условий.

В настоящее время рассматриваются два направления гуманизации. Это адаптация работы к требованиям человека и адаптация человека к работе. В этой связи Нашольд подчеркивает проблему японских предприятий: адаптацию стратегии автоматизации со стратегией гуманизации [7], что еще раз доказывает существование определенных границ процессов рационализации в автомобильной промышленности. Без адаптации труда к человеку (работнику) современный производитель автомобилей может проиграть в конкурентной борьбе, так как именно работник, а не аппарат или новейшее оборудование, является носителем знаний и опыта, так необходимых предприятию [5]. Его компетентность, способности, таланты и знания могут быть максимально использованы только при создании оптимальных условий труда. Именно поэтому меры по улучшению условий труда нацелены на изменение структуры труда, организации труда, окружающей среды работника. Отдельные элементы структуры труда (рабочее место, средства и методы труда) являются самостоятельным объектом исследований в рамках экономики труда.

Адаптация человека к условиям труда возможна благодаря использованию его способностей к обучению (теоретическое и практическое обучение), психосоциальных (поведение в обществе) и физических (практический тренинг) способностей [3]. Адаптация человека к условиям труда может проходить как в долгосрочной, так и краткосрочной перспективе. В краткосрочной перспективе используются резервы профес-

сиональной пригодности, которые были по различным причинам не востребованы, но имелись в запасе у работника. Введение же новых технологий на предприятии требует в свою очередь использования дополнительных навыков и знаний, получение которых возможно лишь в рамках дополнительного образования, а для этого уже требуется время [3]. Керн и Шуман обращают также внимание на социальную компетентность работника (коммуникативные способности, персональная обучаемость моделям поведения) [2], которые имеют важное значение в групповых формах организации труда в автомобильной промышленности.

Гибкость процессов производства, определенная иерархия в управлении требуют использования расширенных форм работы в группах. Залог успеха для работы группы — это соответствующая квалификация всех членов и поддержка со стороны управленческого персонала [13]. Каждому члену группы должны быть предельно ясны цели совместной работы, которая не может быть ограничена способностями и возможностями того или иного члена группы. В современной автомобильной промышленности можно выделить следующие виды организации работы в группах: традиционная; слабая; сильная организация работы в группах на предприятии, ориентированном на использовании только такой формы труда; интегрированная высококвалифицированная работа в группах [14].

Для того, чтобы группа могла эффективно функционировать, должны быть соблюдены следующие условия: по возможности одинаковый уровень квалификации членов группы; небольшая численность группы; систематическая оценка уровня квалификации членов группы, равно как и уровня оплаты; использование общего гуманного подхода, при котором работа в группе помогает развить профессиональные способности работника, предоставляя при этом определенные гарантии [15].

В частично автономных группах, характерных для практики автомобильной промышленности, активно применяются системы организации труда Job Enrichment и Job Rotation. Также в рамках отдельно взятых групп постоянно культивируется ассоциация у отдельно взятого члена с его группой как единым целым (типично для японских предприятий [3]). Что же касается организации работы как самой группы, так и работы внутри нее, то можно выделить ряд особенностей, типичных для тех или иных предприятий (например, США, Швеции или Японии). Так, на одних предприятиях член группы обладает большей самостоятельностью, на других в группе есть лицо, не осуществляющее функций руководства, но представляющее интересы группы и т. д. [16]. Однако для всех частично автономных групп характерно изготовление продукции большой сложности (готовые компоненты, сборка автомобиля), работа на так называемом острове производства, внутренняя иерархия и одинаковая квалификация [9].

Обратимся к национальным особенностям организации труда в автомобильной промышленности. Пио-

нером отрасли являются американские производители. Именно в США в рамках концепции фордизма впервые были разработаны подходящие формы организации труда для массового производства, которые до сих пор применяют с некоторыми изменениями американские автопроизводители.

Под фордизмом понимают комбинацию структуры и системы производства, а также организацию труда. Отличительные особенности фордизма в части организации труда следующие:

- горизонтальное разделение труда в области конечного производства, снабжения, подготовки производства, контроля за качеством;

- четкая организационная дифференциация как с точки зрения иерархии, так и разделения по функциям, работа в узкоспециализированных центрах (планирование, конструкторские разработки и т. д.);

- работа на конвейере в соответствии с его тактовой частотой;

- небольшой срок обучения работы на конвейере;

- минимальный уровень автономности как с технических, так и организационных позиций;

- административное управление на всех уровнях с помощью тщательно проработанных инструкций и приказов [14, 17].

Часто фордизм выступает как синоним тенденций перемен в работе на производстве и значит гораздо больше, чем только принцип разделения труда и различного материального поощрения. Объектом рационализации труда в фордизме выступает монотонно повторяющаяся работа, не требующая высокой квалификации, которая в большом объеме используется на конвейере. Но несмотря на это, можно с уверенностью констатировать тот факт, что фордистская модель производства актуальна и для современного производства. Причиной тому является использование конвейера, хотя уже и разработаны новые концепции монтажа, изготовления модулей или работы в группах.

В новой производственной концепции, так называемой постфордистской организации труда, уже применяются интегрированные рабочие задания (вместо узко специализированных); гибкость выполнения работы как по времени, так и функциональной очередности; групповые формы (вместо изолированного труда); самостоятельная, мотивированная и ориентированная на качество работа (вместо работы в соответствии с жесткими нормами) [4].

Экономический рост и высокие производственные стандарты позволили японским производителям пережить нефтяной кризис 70-х годов прошлого века без сокращения рабочих мест и других производственных конфликтов. В 90-х годах японские автомобильные концерны были примером для остальных компаний [4]. Американские и европейские производители для повышения своей конкурентоспособности неоднократно пытались применить японский опыт, но, как правило, были не так успешны. В настоящее время, в ведущих ассоциации японских автопроизводителей, в ведущих компаниях наблюдается сокращение производства.

Так, компания Toyota в 1998 г. изготовила легковых автомобилей на 8,25 % меньше, чем в 1997 г., а в 2001 г. — на 1,8 % меньше, чем в 2000 г. В 2003 г. наблюдался прирост на 0,38 %, но этого явно недостаточно, чтобы говорить о безоговорочном лидерстве. Японские транспланты (заводы) за границей также не являются абсолютными копиями своих материнских компаний. Поэтому возникает справедливый вопрос об эффективности моделей работы японских компаний, в том числе и в области организации труда.

Управленческая модель поведения и модель принятия решений базируются в Японии на следующих основополагающих элементах: типичное японское представление о ценностях (лояльность и дисциплина); превалирование группового сознания; интересы группы (общности) преобладают над интересами отдельного индивида; семейный характер предприятий [11].

Заработная плата по принципу длительности работы в одной компании, занятость на одном предприятии в течение всей жизни, членство в профсоюзах, созданных самими предприятиями — одни из отличительных особенностей производственной жизни в Японии. К примеру, работники компании Toyota являются членами так называемой общности сотрудников с достаточно большими правами и привилегиями, к которым относятся квартиры, центры досуга и отдыха, предоставляемые на льготных условиях [18]. Именно работа на одном предприятии в течение всей жизни способствует функционированию основополагающих элементов Lean Produktion (поддержание постоянного потенциала рационализаторских предложений). Без гарантии занятости было бы трудно объяснить сотрудникам, почему они должны постоянно улучшать свое рабочее место [9].

Внутри коллективов работников каждой компании существует ранжирование по возрасту, году окончания школы или университета, длительности работы в самой компании. Структура присвоения статуса в японских фирмах гораздо сильнее, чем в западных. Ее иерархичность зачастую наводит на мысль о "вертикальном" обществе. Здесь более предпочтительна работа в группах, нежели собственная компетентность в решении того или иного вопроса. Это противоречит европейским ценностям [9]. Сотрудники японских компаний получают меньше, чем европейцы, количество информации о своей деятельности. Они должны быть постоянно готовыми к изменению своей деятельности в интересах компании.

В Японии также нет четкой зависимости между уровнем квалификации и уровнем заработной платы. Именно поэтому японские фирмы могут более гибко использовать своих сотрудников. Как утверждает высший японский менеджмент: "Нам гораздо выгоднее переобучить своих сотрудников для работы на новом месте, чем их уволить" [19]. Именно поэтому японская модель работы группы в автомобильной промышленности имеет несколько характерных особенностей:

— разделение группы на ядро и вспомогательные силы; каждый сотрудник не обладает закрепленным только за ним рабочим местом; все члены группы мно-

гофункциональны, т. е. должны в любое время уметь выполнить другую работу;

— отсутствие четких границ между производством и конструкторской работой;

— идентификация работника с группой [20] и его слияние с социумом компании [21];

— члены группы несут солидарную ответственность, рабочий день заканчивается только тогда, когда выполнены все поставленные задачи [10];

— член группы в течение рабочего дня может выполнять различные задания [10];

— группа берет на себя обязательства по контролю за качеством, а также промышленный инжиниринг [17];

— готовность к гибкому графику работы для повышения производительности труда группы [20];

— членство в группе устанавливается, как правило, на длительный период времени.

Обратимся к японским предприятиям за рубежом. Японские транспланты строятся, как правило, в местах с высоким уровнем безработицы и зачастую являются там единственным крупным работодателем [9, 14]. На всех заводах добросовестно внедряются концепции работы в группах без учета национальных особенностей работников. Это приводит к тому, что формы организации труда на этих предприятиях имеют мало общего с формами, практикуемыми материнскими компаниями в самой Японии [14].

Почему при создании новых рабочих мест и новых производственных комплексов возникает такая обратная реакция? Многие чиновники, менеджеры и простые сотрудники на Западе ощущают политику двойных стандартов, так называемую двухклассовую систему: первый класс — японские сотрудники, второй класс — иностранные; первый класс — японские поставщики, второй — иностранные и т. д. Как только это замечают иностранные сотрудники японских корпораций, постепенно начинает снижаться желание "самоотверженно" трудиться на благо работодателя [18]. К тому же на трансплантах присутствуют элементы специфической культуры японского предприятия: общие парковки, столовые, общая для всех униформа, что явно противоречит демократическим ценностям Запада [14]. Для японских компаний выход из подобного положения возможен лишь при учете всех национальных и региональных особенностей места, где расположен очередной завод. Практика следования трудовым традициям может быть успешно интегрирована в формы организации труда японских автопроизводителей.

Последний яркий пример оригинальных форм организации труда в автомобильной промышленности — это заводы Volvo в Швеции. В Скандинавии в 60-х годах прошлого века неоднократно предпринимались попытки децентрализации в организации труда на предприятии. Volvo является пионером, совместив на практике принципы гуманности и долгосрочную стратегию предприятия [22]. К концу 70-х годов шведской промышленности был накоплен достаточный опыт по применению новых форм организации труда. Работник и работодатель в прямом смысле слова со-

трудничали между собой как в области определения основных установок по изменению концепций производства, так и по вопросам введения новых технологий.

После публикации в 1974 г. результатов опыта фабрики Volvo в Кальмаре по Швеции прокатилась волна экспериментов, приведших однако к организации труда с учетом конвейера. Устойчивая тенденция комбинации труда в группах и специфики конвейера привела к уменьшению автономности рабочих (гибкий фордизм) [17]. Монтаж готовой продукции с длительным тактом потока на конвейере, повышенные требования, предъявляемые к качеству продукции — вот основные отличительные особенности шведской концепции организации труда. У новой организации труда были свои преимущества: условия труда и профессиональный статус работника были существенно улучшены [14].

В практике шведских автопроизводителей содержание труда для групп, работающих на конвейере, включало не только монтаж комплектующих и оценку качества, но и разделение труда внутри самой группы. При относительно ограниченном горизонтальном разделении труда оставалась вертикальная иерархия сотрудников, функциональная специализация, которые так или иначе влияли на размер заработной платы. Была введена практика профсоюзов для влияния на работников в процессе принятия того или иного управленческого решения [14].

Однако до сих пор остается открытым вопрос, снизили ли эти изменения степень доминирования монотонной однообразной работы на конвейере, не повлекло ли это за собой дополнительных последствий [14]. Известные американские исследователи автомобильной промышленности Вомак и Джонс также критикуют шведскую модель организации труда, называя

ее искусством ручного труда. Они подчеркивают, что экономическая эффективность сборки множества деталей в условиях конвейера с длительным тактом работы вместо соединения нескольких однородных деталей при быстром такте — это утопия [18].

Основным отличием работы групп в условиях "шведской модели" является попытка создания социального компромисса между различными интересами членов группы и работодателем в области производства, управленческой философии предприятия, в вопросах управления персоналом [14]. Особенности группы в "шведской модели" следующие:

- группа должна была решать конкретные производственные задачи (например, монтаж кузова) [3];
- группа несла полную ответственность за планирование, разделение труда внутри группы, контроль за качеством, реализацию наиболее благоприятных социальных условий [9, 14, 23];
- группа являлась обучающейся структурой, каждый член которой был потенциальным учеником [9, 23];
- координацию внутри группы и представление интересов осуществлял лидер группы [9, 23];
- основными требованиями, предъявляемыми к новым членам группы, были владение шведским языком и наличие водительских прав. Какого-либо дополнительного образования не требовалось [23] (но, что интересно, группы, например на заводе в Удевалла, осуществляли полный монтаж автомобиля [9]);
- отсутствие резервного персонала [23].

"Шведская модель" работы в группах — это один из примеров сильной интегрированной организации, которая не является наиболее оптимальной в современных условиях производства. Но, несмотря на разную организацию производства и разную степень самостоятельности в принятии решений на заводах Volvo (рис. 2) [14], у всех предприятий

в составе концерна были общие проблемы. Это нечеткое разграничение ответственности внутри самой группы; плохой уровень взаимодействия между группами; сложности в обеспечении высокого качества при монтаже; отсутствие карьерного роста, несмотря на получение образования; концентрация ответственности, в том числе и в вопросах распределения заработной платы, на одном члене группы (лидере); особенности системы заработной платы, базирующейся на трех элементах (возможностях самого работника, оценке квалификации работы группы в целом через дополнительный бонус, качестве и количестве произведенной продукции) [14]. Все это приводило к неизбежным конфликтам как между группой и предприятием, так и внутри самой группы. Как правило, конфликты внутри группы возникали между членами с разным уровнем образования.

Организация и степень самостоятельности в принятии решения

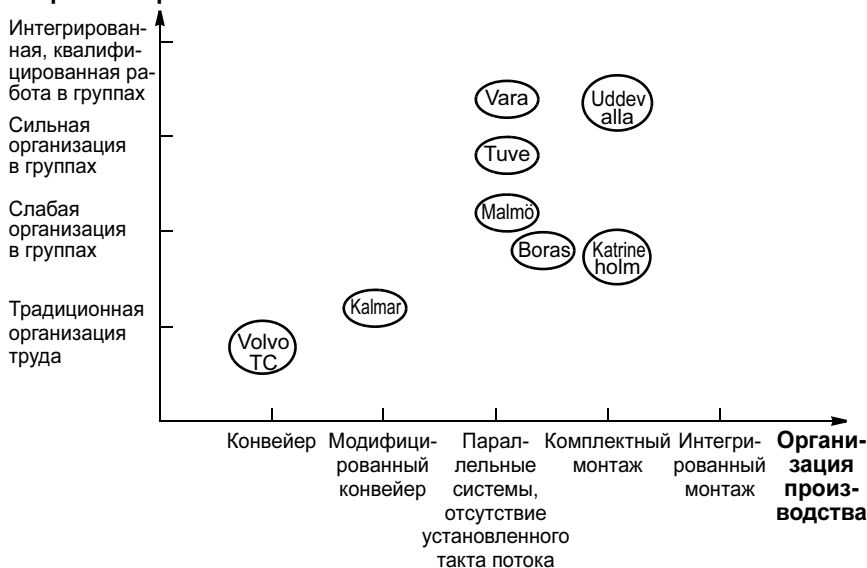


Рис. 2. Организация монтажа и труда на предприятиях Volvo

Несмотря на то, что с помощью экспериментов на автомобильных заводах Швеции удалось улучшить условия труда в целом, было абсолютно ясно, что производительность системы низкая и не соответствует требованиям массового производства, особенно гибкого массового производства [18].

Рассмотренные формы организации труда на предприятиях автомобильной промышленности Японии, Швеции и Америки в настоящее время не используются в чистом виде в автомобильной промышленности, так как постоянно возникает конфликт между эффективностью производства, мерами, направленными на снижение издержек, и новыми гуманными требованиями, предъявляемыми современным обществом к условиям труда. К сожалению, современные производители автомобилей решают такие проблемы просто и всегда в краткосрочной перспективе. Они строят новые заводы в третьих странах (Индии, Анголе, Китае), где человеческий труд дешевый и пока недостаточно защищен местным трудовым законодательством. Такой подход, по меньшей мере, является ошибочным. В настоящее время появляется все больше требований к организации труда даже в тех странах, куда так спешно переносятся производства. К таким требованиям можно отнести высококвалифицированную работу, соответствующий уровень заработной платы, отпуск, возможность кардинально менять рабочее место в рамках одного предприятия, гарантии длительного срока работы и социальной защищенности. Но все это находится в явной конфронтации с системой работы отрасли.

Конвейер долгое время был залогом успеха и основополагающим элементом автомобильной промышленности. Все формы организации труда в отрасли базировались на его принципах работы. Такт потока присутствует даже в "шведской модели". Но конвейер не дает компромиссных решений: или монотонная работа, или убытки. Это рано или поздно приведет к глубокому кризису внутри самой отрасли, так как она не может полностью отказаться от человеческого труда. В качестве примера можно привести тот факт, что Volvo уже не является самостоятельным производителем. Это лишь часть империи Ford.

Особенности фордизма, тойотизма или вольвоизма демонстрируют лишь социальные и индустриальные требования, которые существовали в обществе на момент их разработки. В настоящее время подобные эксперименты, длящиеся с момента начала до получения результатов более десяти лет, вряд ли возможны по причине возросшей конкуренции между производителями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berger R., Servatius H.-G., Kratzer A. (1994), Die Zukunft des Autos hat erst begonnen, München; Zürich: Piper Verl., 260 S.
2. Kern H., Schumann M. (1990), Das Ende der Arbeitsteilung? Rationalisierung in der industriellen Produktion: Bestandaufnahme, Trendbestimmung, München: Beck Verl., 371 S.

3. Kreikebaum H., Herbert K.-J. (1988), Humanisierung der Arbeit: Arbeitsgestaltung im Spannungsfeld ökonomischer, technologischer und humanitärer Ziele, Wiesbaden: Gabler Verl., 242 S.
4. Altmann N., Endo K., Nomura M., Yoshida M. (1998), Innovative Arbeitspolitik? Zur qualifizierten Produktionsarbeit in Japan, Frankfurt am Main; New York: Campus Verl., 411 S.
5. Knaese B., Probst G. (2001), Wissensorientiertes Management der Mitarbeiterfluktuation. Eine Methode zur Reduzierung personeller Wissensrisiken. In: Zeitschrift Führung + Organisation, Heft 01/2001, S. 35—41.
6. Matthöfer H. (1980), Humanisierung der Arbeit und Produktivität in der Industriegesellschaft, Köln: Bund-Verl., 240 S.
7. Naschold F. (1992), Den Wandel organisieren. Erfahrungen des schwedischen Entwicklungsprogramms "Leitung, Organisation, Mitbestimmung" (LOM) im internationalen Wettbewerb, Berlin: Ed. Sigma Verl., 163 S.
8. VDA: Auto Jahresbericht (2004), Frankfurt am Main: VDA Verl., 216 S.
9. Steinkühler M. (1995), Lean Produktion — Das Ende der Arbeitsteilung?, München; Mering: Hampp Verl., 96 S.
10. Fröhner K.-D. (1991), Personal und Organisation als bestimmende Flexibilitätsgrößen in japanischen Betrieben. In: Arbeits- und Betriebsorganisation bei flexiblen Strukturen / Klaus-Dieter Fröhner (Hrsg.), St. Gallen: Gesellschaft für Management und Technologie AG, S. 95—110.
11. Czajor J. (2004), Rekrutierung japanischer Top Talente. In: Personalwirtschaft, Heft 01/2004, S. 34—38.
12. Bösenberg D. (1993), Lean Management: Vorsprung durch schlanke Konzepte, Landsberg / Lech: Verl. Moderne Industrie, 2. Aufl., 302 S.
13. Zander E. (2003), Führung und Teamarbeit. In: Personal, Heft 04/2003, S. 1.
14. Berggren C. (1991), Von Ford zu Volvo: Automobilherstellung in Schweden, Berlin; Heidelberg; New York; London; Paris; Tokio; Hong Kong; Barcelona; Budapest: Springer Verl., 363 S.
15. Hirsch-Kreinsen H., Ramge U. (1994), Qualifizierte Gruppenarbeit: Leistungspolitische Probleme und betriebliche Gestaltungsfelder. In: Arbeitsorientierte Rationalisierung. Fertigungsinsel und Gruppenarbeit im Maschinenbau / Moldaschl Manfred, Schultz-Wild Rainer (Hrsg.), Frankfurt am Main; New York: Campus Verl., S. 33—50.
16. Bartscher-Finzer S. (2001), Teamarbeit und die veränderte Rolle des Meisters. In: Personal, Heft 04/2001, S. 224—230.
17. Dankbaar B. (1988), Die Zukunft der Arbeit in der Automobilindustrie. Zur Einführung. In: Die Zukunft der Arbeit in der Automobilindustrie / Ben Dankbaar, Ulrich Jürgens, Thomas Malsch (Hrsg.), Berlin: Ed. Sigma Verl., S. 13—34.
18. Womack J. P., Jones D. T., Roos D. (1991), Die zweite Revolution in der Automobilindustrie. Konsequenzen aus der weltweiten Studie aus dem Massachusetts Institute of Technology, Frankfurt am Main; New York: Campus Verl., 319 S.
19. Tokunaga S. (1986), Die japanische Arbeitsbeziehungen. In: WSI-Mitteilungen, 1986, Heft 4, S. 329—336.
20. Chaveles S. (1997), Wettbewerbsstrategien japanischer und koreanischer Automobilhersteller: Mobilitätsbarrieren auf dem deutschen Automobilmarkt und Strategien zu ihrer Überwindung, Frankfurt am Main: Peter Lang Verl., 262 S.
21. Stürzl W. (1993), Lean Production in der Praxis: Spitzenleistungen durch Gruppenarbeit, Padeborn: Junfermann Verl., 340 S.
22. Eliasson L. (1991), Erfahrungen mit dem dezentralen Arbeits- und Organisationskonzept der Produktgruppenwerkstatt. In: Arbeits- und Betriebsorganisation bei flexiblen Strukturen / Klaus-Dieter Fröhner (Hrsg.), St. Gallen: Gesellschaft für Management und Technologie AG, S. 53—66.
23. Pornschlegel H. (1991), Das Arbeits- und Fabrikkonzept der neuen Volvo-Montage in Uddevalla. In: Arbeits- und Betriebsorganisation bei flexiblen Strukturen / Klaus-Dieter Fröhner (Hrsg.), St. Gallen: Gesellschaft für Management und Technologie AG, S. 83—94.

Содержание зарубежных журналов¹

TraMetal
(N 101 (июнь/июль), 2006, Франция)

Фрезерование на шлифовальном станке, с. 38—40, 42, ил. 4.

Проанализированы возможности комбинирования операций фрезерования и шлифования на одном шлифовальном станке. Рассмотрены требования, предъявляемые к оборудованию для выполнения таких операций. Приведены примеры реализации технологических процессов и показана эффективность комбинирования этих операций на одном станке.

Новый токарный станок фирмы Okuma, с. 39, ил. 1.
Сообщается о станке OKUMA Multus B300, характеризующемся многофункциональностью, высокой точностью, компенсацией нагрева, позволяющей осуществлять прецизионную обработку даже в условиях варьирования температуры окружающей среды, наличием системы PACS, предохраняющей от столкновений при перемещении органов станка в процессе обработки. Станок оснащен системой ЧПУ, способствующей эргономическому использованию станка. Максимальные диаметр обработки 450 мм, длина 900 мм, частота вращения шпинделя 5000 мин⁻¹, мощность на шпинделя 16/11 кВт и крутящий момент 328 Н·м.

Высокоточное шлифование, с. 44, 46, 48, 49, ил. 4.
Проанализированы условия, которые необходимо выдержать для обеспечения высокоточного круглого шлифования. Среди них высокая жесткость органов станка, систем приводов и системы ЧПУ станка, которые позволяют достичь точности менее 1 мкм. Приведены сведения о системах ЧПУ типа CNC фирмы GE Fanuc и их функциональных возможностях, интерполяционной подсистеме Nano для точного позиционирования приращениями, а также рассмотрены их преимущества.

(N 103 (октябрь), 2006, Франция)

Dubois D. Исследование режимов резания, с. 12, 14, ил. 2.

Фирма Seco Tools, специализирующаяся на производстве инструментов, совместно с фирмами Micron France и Delcam провела конференцию в 2006 г., посвященную высокоскоростной обработке. Приведены примеры обработки деталей из чугуна, сплавов и коррозионно-стойких сталей, режимы резания, а также

типы СОЖ для поддержания постоянства температур в зоне обработки.

Новые инструменты, с. 15—18, ил. 10.

Описаны режущие инструменты, недавно появившиеся на рынке, среди которых сверла малых диаметров (1—4 мм) фирмы CrazyDrill, пластины для обработки деталей для нужд медицинской промышленности фирмы Sandvik Coromant, моноблочные фрезы для черновой обработки фирмы Dixi Polytool, а также инструменты других фирм. Рассматриваются технологические возможности этих инструментов.

Robert E. Высокоскоростная обработка: выбор технологического процесса, с. 22—26, ил. 6.

Проанализированы преимущества высокоскоростной обработки и ее ограничения, обусловленные техническими причинами. Указывается на необходимость тщательного выбора технологического процесса. Приведены примеры обработки с режимами резания крупных деталей из труднообрабатываемых сплавов и титана на многоцелевых станках.

Проблемы охлаждения в процессе обработки, с. 36, 38, ил. 1.

Изложены проблемы, относящиеся к выбору СОЖ применительно к различным видам обработки и связанные с эффективностью отвода теплоты и стружки. Проанализированы факторы, влияющие на охлаждение зоны резания, даны практические рекомендации по выбору СОЖ в зависимости от обрабатываемого материала, а также рассмотрены вопросы экономичности. Приведена таблица, в которой изложены рекомендации по устранению часто встречающихся проблем, связанных с использованием СОЖ.

(N 105 (декабрь), 2006, Франция)

Инструменты для высокоскоростной обработки, с. 6, 8, ил. 2.

Рассматриваются вопросы высокоскоростной обработки деталей из труднообрабатываемых сталей, сплавов и алюминия, начиная с заготовки и кончая финишной обработкой, а также инструменты для нее. Приведены примеры фрез и их параметры: геометрия режущих кромок, число зубьев, формы канавок и др., а также рекомендации по использованию таких фрез.

Инструменты для малых предприятий, с. 10, 12, ил. 2.

Рассматриваются инструменты, применяемые для высокопроизводительной обработки и приводящие тем самым к снижению затрат на последующую чис-

¹ Раздел подготовлен инж. Г. С. Потаповой (по вопросам получения материалов обращаться по тел./факсу: (495) 611 21 37, e-mail: stankoinform@mail.ru).

товую обработку на примере обработки валов. Представлен также специальный инструмент для орбитального фрезерования. Приведены сведения технологического характера для фрез, используемых на многоцелевых станках фирмы Nexus при высокоскоростной обработке.

Инструменты для нанообработки, с. 14, 15, ил. 3.

В США реализуется проект по созданию особо крупного и мощного телескопа JMST, требующего нанометрической точности изготовления его компонентов, для чего были разработаны инструменты для черновой и чистовой обработки зеркала. Для шлифования и прецизионного сферического полирования используется инструментальная система, которая обеспечивает точность обработки в пределах 20 нм. Приведены сведения об этой оснастке, требования, предъявляемые к зажимным патронам, а также их размеры. Описана технология обработки сегментов телескопа и рассматриваются факторы, влияющие на эффективность и результаты обработки.

Высокоскоростная пятикоординатная обработка, с. 18, 20, 22, ил. 3.

Организация SETIM, состоящая из пяти партнеров, в сентябре 2006 г. разработала рассчитанный на 18 месяцев проект перехода с трехкоординатной на пятикоординатную обработку штампов и литейных форм. Приведены примеры такой обработки, сообщается о результатах испытаний на станке фирмы Fidia G996RT (частота вращения шпинделя 24 000 мин⁻¹, мощность 30 кВт, скорость перемещений 45 м/мин, крутящий момент 105 Н · м и др.), параметрах технологических процессов и стратегии пятикоординатной обработки.

(N "Special Nuances", 2006–2007, Франция)

Мировой рынок инструментов, 73 с.

Приведены результаты анализа, в табличном виде сведения и практические рекомендации по выбору режущих материалов, выпускаемых ведущими фирмами в 2007 г. Рассмотрены твердые сплавы, керметы, поликристаллические алмазы с покрытиями и без них, керамика Al₂O₃ и Si₃N₄ и смешанная, в том числе с покрытиями, поликристаллические КНБ с покрытиями и без них, а в качестве обрабатываемых — различные виды сталей, сплавов, чугунов, цветных металлов, композиты, графит, пластики и т. д. Черновая и чистовая обработка этими материалами может производиться всухую, с охлаждением, на сверхвысоких скоростях, с повышенными подачами. Приведены сайты, e-mail и телефоны 73 фирм, включенных в таблицы.

(N 106 (январь/февраль), 2007, Франция)

Технология сверления и растачивания: ежемесячный обзор, с. 6, 8, 9, ил. 4.

Рассматривается работа гибкой производственной ячейки (ГПЯ), состоящей из двух горизонтальных многоцелевых станков, на которой можно обрабатывать пять типов деталей из труднообрабатываемого чугуна. Обработка осуществляется с применением СОЖ и требует высококачественного инструмента. Описана система модульного инструмента Graflex фирмы Seco Tools, рассмотрены ее технологические и экономические преимущества. В качестве примера приведена схема расточной головки, которую можно регулировать для обработки диаметров 50—60 мм на длине до 150 мм. При скорости резания 335 м/мин и подаче 890 мм/об обработка отверстий осуществляется за 3 с. Обработка торцовых поверхностей осуществляется фрезами Otkomill Seco с восьмиугольными режущими пластинами, которые существенно снижают силы резания. Первый и второй черновые проходы осуществляются с глубиной резания 3,2 мм при скорости резания 215 м/мин, а весь цикл из трех проходов занимает 30 с.

Сверла для глубинного сверления, с. 10, ил. 1.

Описаны сверла DeepDrill фирмы Iscar, предназначенные для сверления отверстий глубиной до 10 диаметров. Производительность этих сверл увеличена на 75 % по сравнению с обычными. Сверла Duratomos, имеющие двухслойное покрытие из оксида алюминия Al₂O₃, которое повышает стойкость инструмента и уменьшает наросты, особенно эффективны при обработке сталей в условиях повышенного нагрева.

Универсальные фрезы из быстрорежущей стали, с. 10, ил. 1.

Фирма Sunsteel предложила гамму фрез Elite широкого применения. Технологические возможности фрез расширены за счет больших углов подъема винтовой линии. Все фрезы имеют оптимальную длину, которая превышает длины по стандарту DIN 844 на 20—30 %.

Dubois D. Технологические проблемы в современном производстве, с. 30, 32, 34, ил. 4.

На втором конгрессе по технологии SETIM, состоявшемся 17—20 октября 2006 г., рассматривались вопросы, посвященные процессам обработки и формообразования, обезжиривания и очистки поверхностей, подачи СОЖ и микросмазки, подготовки поверхностей и нанесения покрытий, рециркуляции текучих сред, а также вопросам экологии окружающей среды. Указывается, что несмотря на то, что улучшение экологии потребует значительных вложений, это направление будет превалировать на рынке.

American Mashinist
(N 4, Vol. 151, 2007, США)

Haftl L. Механическая обработка деталей аэрокосмической промышленности, с. 30—32, ил. 2.

Ведущие аэрокосмические фирмы Boeing и Lockheed активно налаживают долговременное партнерство с фирмами, способными поставлять современные металлорежущие станки и инструменты для комплексной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов. Описываются фрезерные станки фирм Makino и Mazak, обеспечивающие обработку с частотой вращения шпинделя $33\,000\text{ мин}^{-1}$ и подачей до $30,5\text{ м/мин}$, и расточные станки фирмы Giddings & Lewis для обработки деталей из титана для самолета Lockheed F-22. В ряде случаев за счет применения соответствующего оборудования время обработки детали удалось уменьшить с 2,5 ч до 40 мин.

Benes J. Зубофрезерование червячной фрезой, с. 39—40, ил. 2.

Червячная фреза фирмы Gleason, выполненная за одно целое с валом, имеет устройство передачи вращающего момента типа D-drive, обеспечивающее контакт по всей поверхности. Это устраняет смещение инструмента при обработке, что уменьшает напряжение по линии контакта. Оптимальная длина фрезы обеспечивает большую смещаемую зону резания, что позволяет обрабатывать несколько червячных колес, для нарезания зубьев которых ранее требовались червячные фрезы диаметром, близким диаметру сопрягаемого червяка. К новинкам фирмы относится покрытие AlCrN, предназначенное для обработки без охлаждения и отличающееся высокими износостойкостью, теплостойкостью и сопротивляемостью окислению.

(N 5, Vol. 151, 2007, США)

Haftl L. Балансировочные станки, с. 30, 32, ил. 1.

Фирма Haimer предлагает балансировочные станки для инструментальных патронов, установки для сборки режущих инструментов по горячей посадке и различные принадлежности, позволяющие сократить затраты на обработку резанием от 20 000 до 40 000 долл. США из расчета на один многоцелевой станок в год. По данным фирмы, применение прошедших балансировку патронов с режущими инструментами увеличивает в 2 раза срок службы шпинделя станка за счет уменьшения износа подшипников, повышает на 10 % объем срезаемого материала и стойкость инструмента. Одновременно улучшается качество обработанной поверхности, повышается точность обработки и уменьшается вибрация при обработке. Особенно эффективны такие патроны при обработке с частотой вращения инструмента свыше $8\,000\text{ мин}^{-1}$.

Bates Ch. Шлифование деталей различной формы, с. 38, 40—41, ил. 2.

Описывается применение круглошлифовального станка для шлифования деталей с поверхностями нецилиндрической формы с одного установка, например нескольких поверхностей кулачкового вала. Успех "некруглого" шлифования зависит в первую очередь от точности перемещения узлов станка, так как процесс шлифования в данном случае представляет интерполяцию перемещения двух осей станка: оси С вращения обрабатываемой детали и оси Х вращения шлифовального круга. Шлифовальный круг подается вперед и назад в соответствии с профилем обрабатываемой поверхности, а частота вращения шпинделя бабки детали увеличивается или уменьшается для обеспечения постоянной силы резания и устранения прижога обрабатываемой поверхности.

Cutting Tool Engineering
(N 8, Vol. 58, 2006, США)

Heuwinkel M. Обработка отверстий, с. 58, 60—62, ил. 5.

Описывается применение насадных цилиндрических фрез с многогранными режущими пластинами с винтовыми режущими кромками для увеличения диаметра ранее обработанного отверстия или для полной обработки отверстий большого диаметра. Обработка ведется методом винтовой интерполяции, позволяющей получать отверстия различного диаметра и глубиной до восьми диаметров. В зависимости от системы программного управления станка и системы координат винтовая интерполяция включает круговое движение относительно осей Х и Y и поступательное перемещение по оси Z для врезания инструмента в обрабатываемый материал.

Зажимное устройство, с. 129, ил. 1.

Фирма Master Work-Holding предлагает зажимное устройство для закрепления обрабатываемых деталей, использующее технологию закрепления за счет сил адгезии при воздействии ультрафиолетового облучения (технология Light Activated Adhesive Gripping — LAAG). Максимальное усилие зажима достигает 26,6 кН. Сначала в плиту устройства вводятся керамические штифты в соответствии с формой детали. Затем выступающая часть штифтов с помощью шприца покрывается клеем, между штифтами устанавливается закрепляемая деталь, а штифты подвергаются воздействию ультрафиолетового облучения.

Очистка СОЖ, с. 156, ил. 1.

Отделение Kine-Spin Barrett фирмы Kinefac Corp. предлагает портативное устройство для удаления твердых частиц из СОЖ. В устройстве используется система Barrett Clanfuge для удаления абразивных частиц, частиц покрытия и металлических частиц.

Центрифуга смонтирована на колесной тележке и обеспечивает циркуляцию очищаемой СОЖ с интенсивностью 36,4 л/мин. Размеры устройства 0,9 (ширина) — 1,8 (длина) м.

Очистное устройство, с. 158, ил. 1.

Фирма Mayfran International предлагает устройство VacuFilter для тонкой очистки СОЖ. Компактный вакуумный фильтр включает насос, прокачивающий СОЖ через фильтрующие элементы для отделения посторонних твердых частиц. Специальный транспортер отводит отделяемые элементы в заданную зону. Также предлагается устройство Coolant Control Center для непрерывного контроля свойств СОЖ и масла.

Пеноотделитель, с. 158, 159, ил. 1.

Фирма Keller Products предлагает сепаратор ТКО с баком вместимостью до 2275 л. Сепаратор представляет пеноотделитель с пневматическим диафрагменным насосом, штуцером и шлангом. Устройство всасывает охлаждающее масло из бака, отделяет стружку и загрязнения и обеспечивает непрерывную циркуляцию охлаждающего масла с интенсивностью 819 л/ч. Оно имеет размеры 355 × 355 мм и может работать независимо от работы станка.

Устройство для очистки СОЖ, с. 160, ил. 1.

Фирма Sanborn Technologies предлагает автоматическое устройство Turbo-Separator, представляющее центрифугу, которая может отделять сухое загрязнение и шлам с интенсивностью до 29,25 кг/ч. Устройство Freddy TOS представляет портативную систему отделения масла с всасывающей головкой для работы в ограниченном пространстве, а устройство UFV250TV — систему ультрафильтрации, обеспечивающую минимальные отходы масла и рециркуляцию рабочей жидкости.

Насос системы охлаждения, с. 161, ил. 1.

Фирма Latham Performance Products предлагает компактный насос высокого давления для системы охлаждения металлорежущего станка. Насос комплектуется высокопроизводительным фильтром и дифференциальным переключателем давления.

Система фильтрации СОЖ, с. 163, ил. 1.

Фирма Transor Filter USA предлагает централизованную систему фильтрации, использующую технологию тонкой очистки One Micron Filtration. Модульная конструкция расширяет технологические возможности системы. Базовый модуль включает 12 фильтрующих резервуаров, холодильную установку мощностью 30 кВт и резервуар хранения чистой среды и большим числом всасывающих насосов. Базовый модуль можно расширять за счет дополнительных модулей с 6 или 12 фильтрующими резервуарами.

DIMA (Die Mashine) (N 6, Vol. 60, 2006, Германия)

Klingauf W. Методы достижения прецизионного шлифования, с. 28—30, ил. 5.

Проанализированы факторы, влияющие на качество шлифованных деталей, производительность и экономичность процессов круглого, бесцентрового, внутреннего шлифования, а также шлифования некруглых деталей. Результаты анализа показали, что такими факторами являются жесткость применяемого оборудования, система ЧПУ типа CNC, система привода и степень автоматизации производственного процесса, а также точность позиционирования детали. Большое значение имеет применение системы корригирования ошибки, особенно при обработке таких деталей, как коленчатые валы и поршни. Применительно к этому созданы системы ЧПУ типа CNC, обеспечивающие позиционирование с нанометрической точностью.

Fertigung (N 6, Vol. 33, 2006, Германия)

Высокопроизводительный электроэрозионный станок, с. 30, ил. 5.

Фирма Sodick Deutschland GmbH выпустила станок Premium AP1L, который помимо высокой производительности отличается высокой точностью обработки, необходимой в медицинских приборах. Магазин станка вмещает 40 электродов диаметром до 41 мм и длиной до 101 мм и массой до 1,3 кг. Они заменяются быстродействующим автоматическим устройством Robotize с точностью позиционирования ±0,02 мм. Перемещение по осям составляет 200, 120, 200 мм, размеры стола — 360 × 320 мм, максимальная масса заготовки — 25 кг, масса станка — 3000 кг.

Сокращение вспомогательного времени, с. 73, ил. 1.

Фирма Voehringer Maschinen GmbH выпустила вертикальные токарные центры NV250 и NV252 для предварительной двухступенчатой обточки зубчатых колес. В зависимости от принятой на предприятии технологии обточка может производиться на двух последовательно расположенных станках первой модели или на одном станке на второй. В обоих случаях имеет место сокращение вспомогательного времени.

Сверхточные шлифовальные станки, с. 74, ил. 1.

Фирма Okamoto Mashine Tool Europe GmbH выпускает станки серии UPG (Ultra Planansation Grinder), обеспечивающие точность деталей в пределах нанометров. Это достигается за счет постоянного регулирования толщин масляной пленки в направляющих скольжения стола в зависимости от величины локальной нагрузки, причем отклонения толщины пленки за счет регулирования снижены до 1/7 от прежних значений.

Международная выставка "Современные технологии обработки материалов, интеллектуальные системы, оборудование, приборы и инструмент" "Технофорум—2007"

На территории Центрального выставочного комплекса "Экспоцентр" (Москва) с 28 мая по 1 июня 2007 г. проходила Международная выставка "Современные технологии обработки материалов, интеллектуальные системы, оборудование, приборы и инструмент", организованная ЦВК "Экспоцентр" и Российской ассоциацией производителей станкоинструментальной продукции "Станкоинструмент".

На выставке были представлены комплексные технологии на базе высокопроизводительного оборудования, комплектующие узлы и изделия, программное обеспечение и т. п. для металлообрабатывающей отрасли. В работе выставки участвовали около 300 экспонентов из 15 стран, в том числе из России. Свою продукцию на выставке продемонстрировали около 230 российских предприятий и компаний.

Ниже приведено краткое описание лишь некоторых экспонатов, демонстрировавшихся на выставке, и предложений фирм-разработчиков (металлообрабатывающие станки, станки для деревообработки, инструмент и т. п.), вызвавших интерес у специалистов.

Ивановский завод тяжелого станкостроения среди прочего оборудования предложил потребителям *горизонтально-расточный станок с ЧПУ и автоматизированной системой управления — горизонтальный обрабатывающий центр ИР1600МФ4 с подвижной стойкой* (рис. 1) для комплексной обработки крупногабаритных корпусных и базовых деталей из черных и цветных металлов. Жесткие чугунные базовые детали станка со стальными объемно-закаленными планками, роликовые опоры качения в направляющих, двигатели

подач переменного тока, редукторы с выборкой люфтов и прецизионные шариковинтовые пары обеспечивают скорости перемещений узлов до 10 м/мин; отсчет перемещений осуществляется круговыми или линейными измерительными датчиками. Портальная (двойная) подвижная стойка и термосимметричная конструкция шпиндельной бабки обеспечивают высокую жесткость, виброустойчивость и точность обработки; вертикальное перемещение шпиндельной бабки по оси Y составляет 2500 мм. Стойка с правой стороны оснащена лифтом для оператора с автономным электроприводом; площадка оператора может выдвигаться в продольном направлении для обеспечения ручной смены инструмента и обслуживания шпинделя. Фрезерный шпиндель смонтирован в четырех прецизионных шариковых подшипниках и обеспечивает высокоэффективную черновую и чистовую обработку с частотой вращения до 1600 или 2000 мин⁻¹; передняя опора фрезерного шпинделя с внешним диаметром 450 мм вынесена на расстоянии 530 мм от торца шпиндельной бабки. Станок имеет магазин на 80 инструментов, смонтированный на левом торце подвижной стойки. Он также оснащен системой циркуляционной смазки подшипников шпинделя, узлов главного привода, системой централизованной автоматической дозированной смазки направляющих и шариковинтовых пар с применением станций смазки. Система ЧПУ Sinumerik 8400 обеспечивает контурное управление по четырем координатам.

Московский станкостроительный завод "Салют" представил зубошлифовальный станок МШ504С с ЧПУ (рис. 2), работающий по технологии обката и предназ-

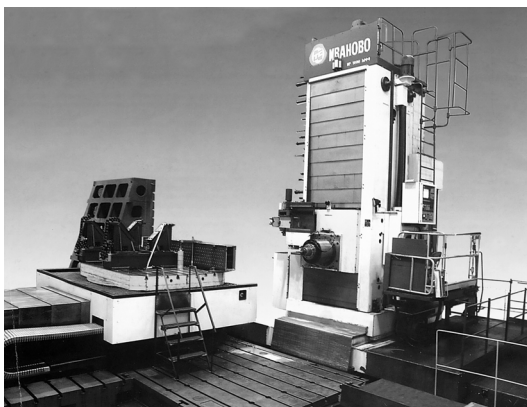


Рис. 1. Горизонтально-расточный станок с ЧПУ и автоматизированной системой управления — горизонтальный обрабатывающий центр ИР1600МФ4 с подвижной стойкой

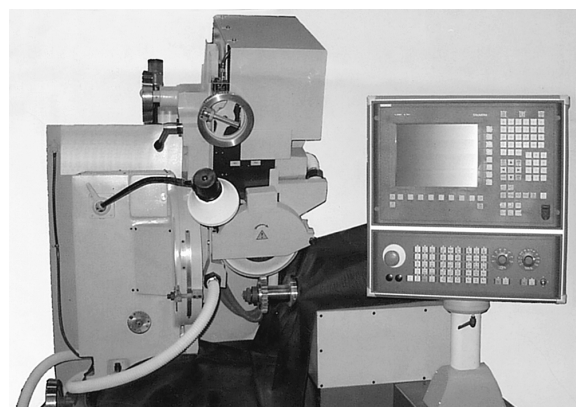


Рис. 2. Зубошлифовальный станок МШ504С с ЧПУ

наченный для окончательной обработки эвольвентного профиля долбяков, шеверов и измерительных колес с модификацией зуба по высоте и длине. Система ЧПУ Sinumerik 840Di осуществляет функцию деления и обеспечивает формообразование зуба. На станке можно обрабатывать изделия диаметром 60—320 мм. Наибольшие — ширина прямозубого венца 70 мм, угол наклона зубьев $\pm 35^\circ$, пределы обрабатываемых чисел зубьев 1—999. Наибольший диаметр шлифовального круга 750 мм, его частота вращения (регулирование бесступенчатое) 100—900 мин⁻¹. Скорость правки при бесступенчатом регулировании 0,16—0,32 м/мин. Мощность привода главного движения 1,5 кВт. Суммарная мощность установленных на станке электродвигателей 5,4 кВт. Габаритные размеры станка с приставным оборудованием 2550 × 2200 × 2200 мм, масса 3,8 т;

— *профилешлифовальный станок МШ397-1V*, обеспечивающий обработку шлицевых валов и протяжек с различными профилями, а также зубчатых колес. Гибкость управления обеспечивает не только выбор оптимальных режимов шлифования (последовательность снятия припуска, большое число различных скоростей стола, подач инструмента, частот, глубин и скоростей правки и т. п. в одном цикле), но и возможность обработки протяжек со специфическими особенностями (например, протяжки с "закрытыми" с обеих сторон участками, расположенными вдоль оси, с возможностью шлифования без движения стола или имеющие пропущенные впадины). Возможности гибкого профилирования шлифовального круга, обеспечиваемые управляемым от УЧПУ механизмом правки, позволяют одновременно шлифовать боковые стороны, внутреннюю поверхность, закругления и фаски у основания и на вершине шлица. Настройка узлов и систем станка, обеспечивающих цикл и профиль шлифовального круга, осуществляется с пульта. Ввод в УЧПУ данных по изделию и режимам (непосредственно из чертежа или технической карты), а также подналадка по результатам (в том числе промежуточным) шлифования осуществляются в диалоговом режиме, исключая необходимость владения знаниями по программированию УЧПУ. Предусмотрена возможность дополнительной корректировки каждого элемента профиля (левой и правой сторон внутреннего диаметра). Высокое качество обслуживания обеспечивается визуальной (с дисплея пульта управления) диагностикой вводимых параметров и работы отдельных систем станка. Предусмотрена возможность моделирования на дисплее цикла обработки и профиля шлифовального круга. Диаметр обрабатываемого изделия 11—260 мм при его длине 1850 мм. Модуль зубчатого колеса 1—6 мм. Суммарная мощность привода станка 10 кВт, мощность привода шлифовального круга 3 кВт. Число управляемых координат 6 шт. Габаритные размеры станка 5500 × 3400 × 2000 мм, масса 7,5 т.

ООО "Боровичский завод деревообрабатывающих станков (Боровичи, Новгородская обл.) предложил потребителям гамму деревообрабатываю-

щих станков. Приведем краткое описание только одного, так как по своим возможностям они очень схожи.

Строгальный (продольно-фрезерный) четырехсторонний станок С16-43М для плоского и профильного фрезерования досок, брусков и планок. Станок имеет четыре суппорта: нижний, правый, левый и верхний. Профильные работы выполняются боковыми и верхней фрезами. Станок оснащен жесткой станиной, устраняющей вибрацию при работе; двумя шпинделями мощностью привода 4 кВт каждый и двумя шпинделями мощностью по 5,5 кВт; механизм подачи с верхними и нижними подающими роликами с мощностью электродвигателя 1,5 кВт; длинным передним столом и цифровым отсчетным устройством. Настройки на размер с точностью до 0,1 мм. Ширина обрабатываемой заготовки 32—160 мм, толщина — 10—60 мм при длине 600 мм. Наибольший припуск при обработке цилиндрическими фрезами 8 мм, глубина обрабатываемого профиля до 20 мм. Подача заготовки при обработке 10, 15 и 20 м/мин. Габаритные размеры станка 3115 × 1475 × 1435 мм, масса 1,5 т. Суммарная мощность всех электродвигателей станка 20,5 кВт.

Самарское научно-производственное предприятие координатно-расточных станков демонстрировало *координатно-расточной прецизионный станок 2E450AФ30*, обеспечивающий высокоточную обработку резанием деталей массой до 600 кг. Высокая точность и качество работы станка обеспечиваются за счет жесткости корпусных деталей, образующих несущую систему станка. Станок оснащен рабочим столом размером 1120 × 630 мм, его продольное перемещение 1000 мм, поперечное — 630 мм со скоростью 0,5—6000 мм/мин. Вылет оси шпинделя 710 мм. Наибольшие — диаметр сверления 30 мм, диаметр расточки 250 мм. Частота вращения шпинделя 20—2500 мин⁻¹. Масса обрабатываемых деталей до 600 кг. Мощность электродвигателя привода 3 кВт. Габаритные размеры станка 3600 × 3200 × 3000 мм, масса 8 т.

Компания "ДИАМЕХ 2000" (Москва) представила портативные приборы для измерения и анализа вибрации.

Портативный двухканальный виброанализатор АГАТ-М (рис. 3) для анализа параметров вибрации и проведения двухплоскостной динамической балансировки вращающегося оборудования. Прибор укомплектован программным обеспечением "Агат-протокол", значительно упрощающим процесс обработки и хранения данных балансировки. Использование прибора в качестве сборщика данных совместно с программным обеспечением позволяет создать полноценную систему прогнозируемого обслуживания оборудования. Отличительной особенностью прибора является наличие функции экспресс-диагностики подшипников качения, которая по разовому замеру позволяет определить дефекты монтажа, зарождающиеся дефекты подшипников, а также степень их износа. Частотный диапазон прибора 2—10 000 Гц, число измерительных каналов 2 шт. Прибор работает при темпе-



Рис. 3. Портативный двухканальный виброанализатор "Агат-М"

ратуре $-10-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Длительность его работы от аккумулятора более 6 ч при погрешности менее 5 %. Исполнение — взрывозащищенное 2ExnLIICT4X. Масса прибора без датчиков и кабелей 870 г. Для определения собственных частот агрегата и его резонансов в приборе реализованы функции разгона и выбега, в том числе одновременно по двум каналам и спектру собственных частот.

Виброметр "Янтарь-М" для измерения виброскорости, виброускорения и виброперемещения в стандартных и установленных пользователем частотных диапазонах с заданным временем усреднений, а также сравнения полученных данных с установленными нормами. Использование прибора не требует специальных навыков. Возможность диагностики любых роторных механизмов делает виброметр незаменимым при оценке их технического состояния. В приборе реализована функция экспресс-диагностики состояния подшипников качения, позволяющая определить наличие зарождающихся дефектов элементов подшипников, а также дефектов монтажа и износа подшипников. Частотный диапазон прибора 2—10 000 Гц. Число измеряемых каналов 1 шт. Прибор работает при температуре $-10-60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Длительность его работы от аккумулятора более 6 ч при погрешности менее 5 %. Прибор также имеет взрывозащищенное исполнение. Масса прибора 325 г. Прибор укомплектован наушниками, позволяющими производить оценку состояния агрегата по шумам.

Компания "Станковендт" (Москва) продемонстрировала на выставке специальный станок DIATOS 426 для шлифовки прокатных шайб и валков, изготовленных из твердых сплавов или других материалов алмазными или эльборовыми кругами. Станок оборудован агрегатом W43 для управления системой ЧПУ фрезерования канавок в шайбах или валках алмазным или твердосплавным инструментом. Программирование по двум осям позволяет шлифовать канавки

различных размеров одним профильным кругом (TAS-метод). Максимальные — длина шлифования 2000 мм, диаметр шлифования 420 мм. Масса изделия, обрабатываемого между центрами, 2 т. Продольное перемещение рабочего стола 2100 мм со скоростью 0,00002—4 м/мин, поперечное перемещение стола 320 мм с ускоренной подачей 4 м/мин при точности позиционирования 0,001 мм. Шлифовальный шпиндель диаметром 150 мм вращается с частотой 100—2500 мин^{-1} , мощность его привода 17 кВт.

АО "Кировский завод "Красный инструментальщик" предложило потребителям свою продукцию, приведем краткое описание некоторых экспонатов.

Рычажные микрометры типа МРИ для измерения наружных размеров. Измерительные поверхности микрометров оснащены твердым сплавом. В комплект микрометра входят установочные меры к микрометрам с верхним пределом измерения до 300, от 300 до 1000 и свыше 1000 мм. Цена деления шкалы барабана микрометра 0,01 мм.

Микрометры типа МЛ для измерения толщины листов и лент. Цена деления микрометра 0,01 мм. Измерительные поверхности прибора оснащены твердым сплавом.

Гладкий микрометр МК Ц25 (рис. 4) для измерения наружных размеров изделий. Микрометр применяют в машиностроении и других отраслях промышленности. Измерительные поверхности микрометра покрыты твердым сплавом. Измерительное перемещение микроиндентора 25 мм, шаг дискретности 0,001 мм. Микрометр выполняет следующие функции: выдачу цифровой информации в прямом ходе (с указанием знака и абсолютного значения); установку начала отсчета в абсолютной системе координат; предварительную установку нуля; возможность измерения величин в миллиметрах и дюймах; вывод результатов измерений на внешние устройства (через цифровой интерфейс RS232). Габаритные размеры микрометра 170 × 27 × 65 мм, масса 250 г.

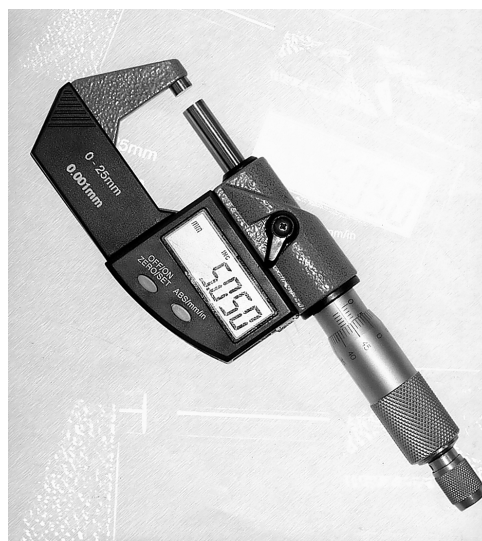


Рис. 4. Гладкий микрометр МК Ц25

Специальный микрометр МКН550 (рис. 5) для измерения наружных диаметров труб, применяемый в нефтегазовой промышленности и машиностроении. Измерительные поверхности микрометра оснащены твердым сплавом. Детали выполнены из коррозионно-стойкой стали или имеют надежное антикоррозионное покрытие, что позволяет эксплуатировать микрометр при температуре окружающей среды $-20\text{—}35\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности более 80 %. Измерительное перемещение микровинта 50 мм, габаритные размеры $755\times 75\times 435\text{ мм}$, масса 5,5 кг.

Штангензубомер ШЗН-18 (рис. 6) для измерения расстояния между разноименными боковыми поверхностями (толщины) зуба цилиндрических прямозубых и косозубых колес внешнего зацепления 11-й и 12-й степеней точности (ГОСТ 1643—81) по постоянной хорде или хорде делительной окружности. В рамке прибора неподвижной губкой в двух взаимно перпендикулярных пазах перемещаются штанга с подвижной губкой и высотная линейка. На штанге и высотной линейке нанесены углубленные шкалы, что предотвращает их износ при перемещении в рамке. Рамка снабжена нониусами. Для точной установки на размер высотной линейки и штанги с подвижной губкой служат микроподачи, а для их фиксации — стопорные винты. Шкалы штанги, высотной линейки и нониусов выполнены с матовым хромовым покрытием, исключающим бликование. Габаритные размеры прибора $125\times 15\times 110\text{ мм}$.

Маятниковый угломер ЗУРИ-М (рис. 7) для измерения углов режущих инструментов различных типов. Работа угломера основана на принципе действия массы маятника, жестко соединенного с показывающей стрелкой и имеющего общую с ней ось поворота. Углы поворота маятника отсчитываются стрелкой по круговой шкале. В процессе измерения контрольная линейка угломера соприкасается с соответствующей поверхностью режущего инструмента. Угломер имеет устройство для фиксации положения стрелки. Габаритные размеры прибора $90\times 92\times 100\text{ мм}$.

Группа компаний "Томский инструмент" демонстрировала на выставке высокоточный инструмент, изготовленный по новой технологии — методом вышлифовки.

Спиральные сверла диаметром 2—20 мм с цилиндрическим хвостовиком для сверления отверстий в конструкционных сталях повышенной обрабатываемости твердостью 159—229 НВ, углеродистых и легированных сталях твердостью 179—321 НВ, углеродистых и инструментальных сталях твердостью 179—269 НВ, серых и ковких чугунах твердостью 170—210 НВ. Сверла класса точности А1 являются сверлами повышенной точности. Канавки и спинки таких сверл изготовлены методом вышлифовки. Сверла, изготовленные по технологии вышлифовки профиля, имеют следующие преимущества: стабильность размеров профиля; малые значения осевого и радиального биения; возможность нанесения одно- и многослойных износостойких покрытий. Малые значения осевого и радиального биения сверл позволяют получать равномерную нагрузку на режущие кромки, а это повышает стойкость; просверливаемое отверстие не разбивается, что важно, если по технологическому процессу отверстие после сверления подвергается дальнейшей обработке — нарезанию резьбы или зенкерования и развертыванию. Так сверлами, изготов-



Рис. 5. Специальный микрометр МКН550

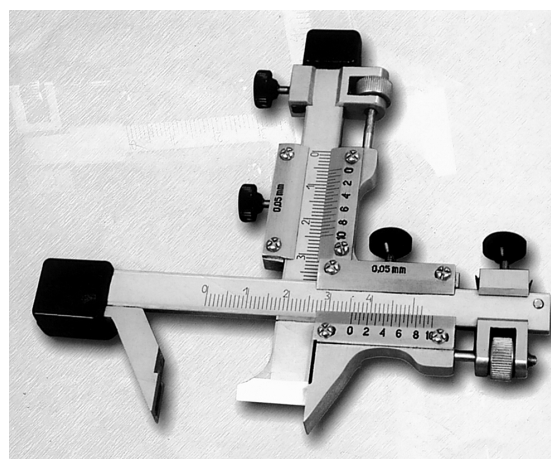


Рис. 6. Штангензубомер ШЗН-18

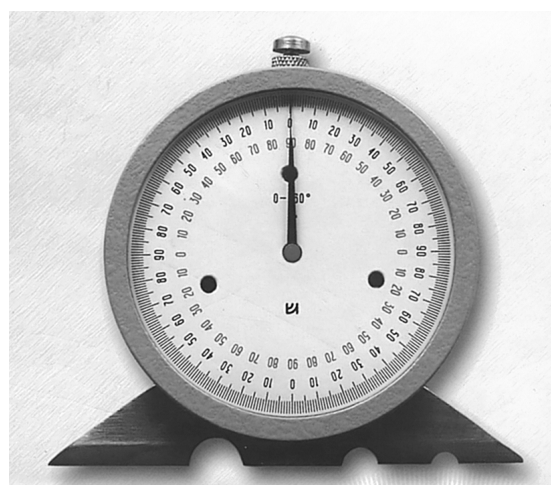


Рис. 7. Маятниковый угломер ЗУРИ-М

ленными по технологии вышлифовки, можно получать отверстия 10-го качества, что в обычных условиях исключает операцию зенкерования. Наличие на сверлах износостойкого покрытия TiN способствует лучшему отводу стружки, предохраняет режущие кромки от высоких температур, обеспечивая увеличение скорости резания до 28 м/мин и стойкости сверл.

Спиральные сверла с цилиндрическим хвостовиком диаметром 2—20 мм для сверления отверстий в титановых сплавах на универсальном оборудовании, специальных станках, станках с ЧПУ и автоматических линиях. Сверла повышенной точности также изготовлены по технологии вышлифовки. Угол наклона стружечной канавки сверла 40°, угол при вершине 135°. Преимущества данных сверл — оптимальные геометрические параметры, стабильность размеров профиля, малые значения осевого и радиального биения, возможность нанесения одно- и многослойных износостойких покрытий.

Спиральные сверла СЦ0401А для сверления отверстий в изделиях из титановых и алюминиевых сплавов ручными пневмо- и электродрелями. Сверла также имеют вышлифованный профиль, а значит, являются сверлами повышенной точности. Преимущество сверл те же, что и у описанных выше.

Сверла ступенчатые для сверления отверстий диаметром 3—34 мм в листовом материале. Сверло ступенчатое затыловочное имеет 8—13 ступеней, постепенно увеличивающихся в диаметре. Такие сверла при сверлении сквозных отверстий в листовом материале обладают следующими преимуществами по сравнению со спиральными сверлами: одним сверлом можно просверлить до 13 отверстий различных диаметров (взамен комплекта спиральных сверл из 13 штук); поломка сверла при выходе из отверстия исключается; на выходе из отверстия почти не образуются заусенцы; отверстие получается качественное недеформированное. Максимальная толщина обрабатываемого листа 3—5 мм.

Сверла пустотельные диаметром 12—50 мм для сверления сквозных отверстий в крупногабаритных металлоконструкциях. Сверление осуществляется с помощью ручных переносных станков, имеющих следующее оснащение: магнитный зажимной элемент (крепление станка к изделию); систему подачи СОЖ; приспособление для выталкивания высверленной части. Пустотельные сверла при сверлении сквозного отверстия обладают рядом преимуществ по сравнению с цельными спиральными сверлами: малое усилие резания; отсутствие (или очень малая величина) заусенцев на выходе сверла; наличие большего числа зубьев на сверле и отличная от спиральных сверл геометрия режущей части исключают поломку сверла при выходе из отверстия. Максимальная глубина сверления 25—50 мм.

Фрезы концевые шпоночные с цилиндрическим хвостовиком для обработки шпоночных пазов в изделиях из стали. Фрезы повышенной точности изготовлены методом вышлифовки из цельных заготовок и имеют износостойкое покрытие TiN.

Машинные метчики с прямыми стружечными канавками и винтовой подточкой по передней грани для нарезания метрической резьбы в сквозных отверстиях из стали с пределом прочности до 800 МПа, латуни, отожженного чугуна. Наличие винтовой подточки по передней грани (скос пера) обеспечивает совпадение направления схода стружки с направлением подачи метчика, что не позволяет стружке накапливаться на режущей части метчика. Это в свою очередь уменьшает величину крутящего момента и вероятность заклинивания и поломки метчика, что особенно важно при нарезании резьбы в автоматическом режиме, в частности на станках с ЧПУ и станках типа "обрабатывающий центр". Скорость резания машинного метчика конструкционной стали 15—18 м/мин, легированной — 6—8 м/мин, инструментальной стали — 6 м/мин, сплавов меди — 10—12 м/мин, чугунов — 10—18 м/мин. Нанесение на метчики износостойкого покрытия TiN улучшает отвод стружки, предохраняет режущие кромки от высоких температур при увеличении скорости резания и стойкости метчика.

Машинные метчики с шахматным расположением зубьев и винтовой подточкой по передней грани для нарезания метрической резьбы в изделиях из вязких и труднообрабатываемых материалов (алюминия, меди, латуни, мягкой стали, жаропрочной стали, титановых сплавов) с пределом прочности до 800 МПа и отожженного чугуна. При нарезании резьбы в вязких и труднообрабатываемых материалах процесс резания сопровождается большими силами трения между витками инструмента и детали, а также "налипанием" стружки в канавках между витками. Это может привести к защемлению метчика в отверстии. Для улучшения условий резания на таких метчиках выполнено вырезание зубьев на калибрующей части — от одного пера к другому в шахматном порядке.

ПО "Сморгонский завод оптического станкостроения" (Сморгонь, Республика Беларусь) предложило потребителям свою продукцию.

Токарно-копировальный деревообрабатывающий настольный станок ТК-200 для токарной обработки дерева и других мягких материалов. Станок оснащен копировальным устройством, позволяющим изготавливать партии однообразной продукции с высокой точностью воспроизводства конфигурации. Копировальное устройство позволяет проводить продольное и поперечное копирование. Максимальный диаметр обрабатываемой детали над станиной 400 мм, в центрах — 320 мм, при поперечном копировании — 400 мм, при продольном — 200 мм. Максимальная длина обрабатываемой детали без копировального устройства 1000 мм, с копировальным устройством — 860 мм. Частота вращения шпинделя 600—285 мин⁻¹. Питание станка 380 или 220 В. Суммарная установленная мощность 0,55 кВт. Габаритные размеры станка 1740 × 800 × 510 мм, масса 165 кг.

Вакуумную установку ВУ-1100 "Оптик" для нанесения оптических функциональных тонкопленочных

покрытий методами термического испарения с использованием электронно-лучевых и резистивных испарителей. Контроль за технологическими параметрами осуществляет автоматизированная система управления. Установка оснащена системой фотометрического контроля оптической толщины пленки в диапазоне длин волн 250—1100 нм и системой измерения толщины и скорости осаждения покрытия по изменению параметров кварцевого резонатора. Максимальная температура нагрева подложек 320 °С. Максимальное число слоев покрытия, получаемое в одном технологическом цикле под управлением АСУТП, составляет 32 шт. Мощность установки 75 кВт, занимаемая площадь 16 м², масса 3 т. Оператор управляет установкой с АРМ. Оно реализовано на панельном ПК под операционной системой, например Windows NT/200.

Состояние установки отображается в виде мнемосхем, таблиц и списков.

Международная выставка "Технофорум—2007" предоставила экспонентам большие возможности для презентации инновационных продуктов и их активного продвижения на мировой рынок.

В рамках выставки организована научно-техническая конференция "Инновационные технологии, оборудование, комплектующие изделия, инструмент отечественным машиностроителям", проведены круглые столы, где присутствовали ведущие ученые технических вузов и специалисты предприятий, а также презентации и семинары отдельных фирм, консультации и обмен мнениями по вопросам сертификации машиностроительной продукции.

А. Н. Иванов, инж.

2-я Международная специализированная выставка "Формы. Пресс-формы. Штампы" "РОСМОЛД'2007"

В июне 2007 г. в МВЦ "Крокус Экспо" (Москва) прошла единственная в России 2-я Международная специализированная выставка "Формы. Пресс-формы. Штампы" "РОСМОЛД'2007". В выставке участвовали отечественные и зарубежные фирмы и компании, использующие и реализующие уникальные технологии и оборудование для быстрого прототипирования и изготовления объектов в различных областях промышленности.

Выставка "РОСМОЛД" проходит в России второй раз подряд. В этом году она отличается большим числом экспонентов, посетителей, участников — представителей разных отечественных и зарубежных фирм. Именно поэтому международная выставочная компания "ЭКСПОТИМ" — официальный организатор мероприятия — пригласила в качестве консультанта немецкую фирму Demat — организатора одной из крупнейших мировых выставок средств технологического оснащения "EuroMold" (Франкфурт-на-Майне, Германия).

В этом году выставка заняла свыше 4600 м². В ней приняли участие свыше 150 экспонентов из 16 стран мира (в 2006 г. число участников составило 92 экспонента из 14 стран). На выставке были представлены также коллективные экспозиции из Германии, Турции, Финляндии, Португалии, Италии.

Особый интерес представили экспоненты, объединенные в салон "Быстрое прототипирование и экспонирование". Около 20 отечественных и зарубежных фирм представили наукоемкое оборудование, результаты научных и прикладных исследований и инноваций в области быстрого прототипирования и изготовления моделей.

Суть данного процесса заключается в послойном выращивании копии различных объектов (от ювелирного изделия до автомобиля, узлов самолета и двигателей к ним) на основе компьютерной 3Д-модели без применения традиционной технологической оснастки (рис. 1). Использование прототипа позволяет оценить внешний вид детали, проверить надежность конструкции, произвести сборку и необходимое тестирование, изготовить пробную серию изделий. Ее преимущест-



Рис. 1. Схема технологического процесса быстрого прототипирования и изготовления эластичной пресс-формы

Таблица 1

Оборудование	Технология		
Для изготовления прототипов фирмы 3D Systems	SLS-технология модели Vanguard — послойное спекание порошковых материалов. Минимальный шаг построения 0,1 мм	MJM-технология модели Termojet реализуется с помощью трехмерного струйного воскового принтера. Минимальный шаг построения 0,04 мм	SLA-технология модели Viper реализуется методом стереолитографии. Минимальный шаг построения 0,025 мм
Для вакуумного литья цветных металлов, полиуретанов и воска фирмы MCP HEK	Литейная машина MPA-1000, объем тигля 10 л. Максимальные размеры (длина × высота) опоки 550 × 720 мм Максимальная температура 1200 °С	Установка MCP4/04 в составе комплекса оборудования	

вами являются скорость, точность, возможность сократить сроки и затраты на подготовку производства.

В этом году презентацию своих возможностей организовали известные отечественные инжиниринговые и научные фирмы.

Центр быстрого прототипирования ФГУП "НАМИ". Оснащенный современным оборудованием ведущих мировых фирм, является уникальным в России предприятием, предлагающим полный комплекс услуг по разработке и быстрому изготовлению опытных образцов и малых партий изделий (от 3 ч до 3 сут.) в различных областях промышленности.

В табл. 1 приведено действующее оборудование ЦБП и его технологические возможности.

На выставке были широко представлены примеры мастер-моделей и деталей для автомобилей и моторостроения, автокомпонентов, бытовой техники и товаров народного потребления и других отраслей (рис. 2).

Уральская машиностроительная корпорация "Пумори-СИЗ" (Екатеринбург). В составе корпорации в 1996 г. основан Центр проектирования и моделирования, в сферу деятельности которого входит разработка трехмерных изделий, изготовление прототипов с помощью технологий быстрой подготовки производства, консалтинг и системотехника. Центр оснащен

комплексом наукоемкого оборудования, включая установки PM 250™ и PM 100™ фирмы Purnori (США) для твердофазного лазерного синтеза лазерных керамических и металлических порошков при изготовлении модели и оснастки.

Центр использует высокоэффективную систему быстрого прототипирования Perfactory SXGA (США). Фирма активно сотрудничает с американскими компаниями — производителями оборудования быстрой подготовки производства Helisys Inc. и Tekcat Industries, а также заключила дистрибьюторские соглашения на поставку оборудования быстрой подготовки производства таких известных в мире компаний, как Envisiontec, Cubic Technologies, Stratoconcept, Phenix Systems, POM Group.

ЗАО "Инженерные технологии" (С.-Петербург). Специализируется на создании прототипов пластмассовых и оптических деталей (полимерной оптикой) по электронным моделям (за 1—2 дня). Компания оснащена комплексом оборудования для изготовления малых партий пластмассовых деталей методом литья в вакууме в силиконовые формы (без применения металлической оснастки) за 2—3 недели.

Фирма "СОЛВЕР. Инженерный консалтинг" (Воронеж). Специализируется на построении "умного"

производства на машиностроительных предприятиях путем внедрения прогрессивных технологий, технологического оборудования и программного обеспечения. Является генеральным дистрибьютором оборудования и технологии быстрого прототипирования фирмы Stratasys Inc (США). Оборудование фирмы Stratasys использует технологию FDM (Fused Deposition Modeling), заключающуюся в послойной укладке разогретой полимерной нити в соответствии с геометрией математической модели САД/САМ/САЕ-детали. Основным материалом, используемым в установках фирмы для изготовления прототипов, является ABS-пластик. В качестве экспоната фирма Stratasys представила установку быстрого прототипиро-

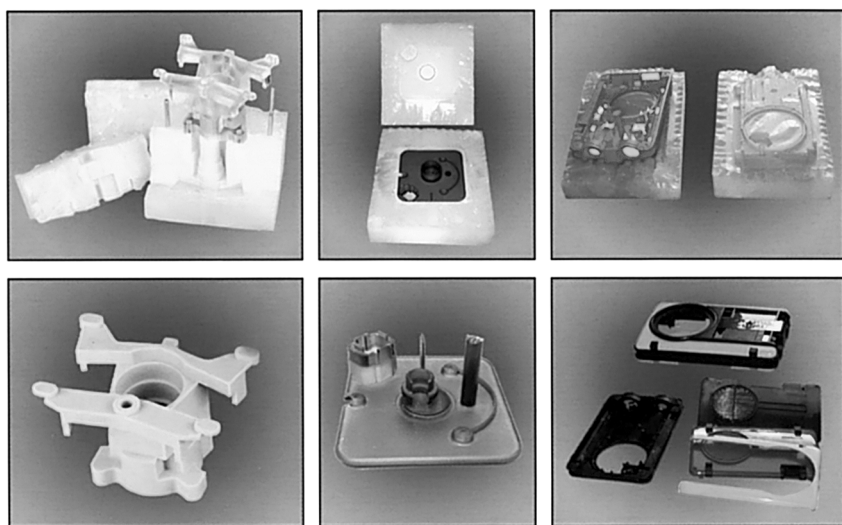


Рис. 2. Детали, полученные методом быстрого прототипирования (ЦБП ФГУП ГНЦ РФ "НАМИ")

вания детали из промышленных пластиков Dimension 1200 (рис. 3).

Техническая характеристика установки Dimension 1200

Модификация	BST, SST
Габаритные размеры формируемого изделия, мм	254 × 254 × 305
Точность изготовления, мм	±0,254
Материал	ABS-пластик
Программное обеспечение	Catalyst EX™
Габаритные размеры установки, мм	838 × 737 × 1143
Масса, кг	148

В продуктовом ряду установок Stratasys более пяти моделей 10 модификаций, позволяющих выбрать оптимальную по производительности и стоимости. Установки компактны, просты и недороги в обслуживании, не требуют специальных помещений.

Среди предприятий, по достоинству оценивших прототипирование на установках фирмы Stratasys, поставленных фирмой Солвер — ОАО "НПК "Элара", Владимирский завод "Автоприбор", КБ "Пеленг" (Минск), ООО "Система", ООО "Интех" (Обнинск Моск. обл.), ЗАО "АРТИ" (Москва) и др.

ООО "АБ-Универсал" (Москва). Инжиниринговая фирма традиционно занимается продвижением оборудования и материалов для изготовления методом быстрого прототипирования (RP) из пластмасс и ме-

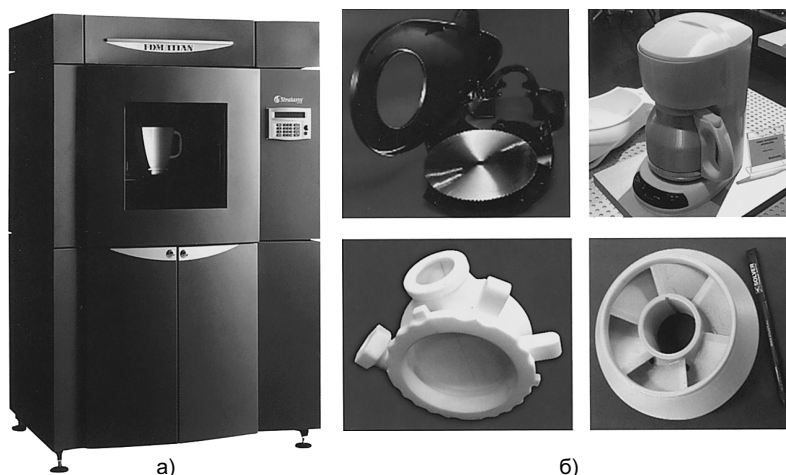


Рис. 3. Установка быстрого прототипирования Stratasys Dimension 1200 (а) и изготовленные модели (б)

таллов. Является официальным дистрибьютером в России послыонного синтеза фирмы Object Geometries Ltd (Израиль), а также установок для лазерного спекания металлических порошков фирм EOS и Arcam (Израиль).

Техническая характеристика установок Object Geometries с различными 3Д-принтерами приведена в табл. 2.

Таблица 2

Параметр	Профессиональный принтер			Офисный принтер	
	EDEN500V	EDEN350V	EDEN350	EDEN260	EDEN250
Габаритный размер стола, мм	500 × 400	350 × 350		260 × 260	
Габаритный размер рабочей зоны, мм	490 × 390 × 200	340 × 340 × 200		250 × 250 × 200	
Скорость построения, мм/ч, на проход	12/24		12		6/12
Разрешение X, Y, Z, dpi	600, 600, 1600			600, 300, 1600	
Толщина слоя, мкм	30/16		16		30/16
Число головок	8			4	
Число картриджей	4		2		
Вместимость картриджа, кг	3,6			2	
Габаритный размер установки, мм	1320 × 990 × 1200			870 × 735 × 1200	
Масса установки, кг	410			280	
Электропитание, В, Гц, кВт	110—240, 50/60, 1,5				
Условия эксплуатации:					
температура, °С	18—25				
влажность, %	30—70				
Точность изготовления, мм	0,1—0,3 (в зависимости от геометрии детали и ее ориентации)				
Материал					
FullCure 720 (полупрозрачный)	+	+	+	+	+
Vero (белый, черный, синий)	+	+	+	+	+
Tango (черный, серый)	+	+	+	-	-



Рис. 4. Установки EDEN250 для изготовления прототипов фирмы Object Geometris Ltd (Израиль)

На стенде фирмы "АБ-Универсал" была представлена офисная модель установки Object с принтером EDEN250 (рис. 4). Решения Object используют многие ведущие мировые корпорации, работающие в области автомобилестроения, машиностроения, производства ТНП и других отраслях промышленности. На стенде были представлены прототипы и готовые детали, спроектированные и изготовленные "АБ-Универсал" под различные задачи российских заказчиков.

Особо следует отметить первый в России и странах СНГ Центр быстрого прототипирования в ОАО "НИИТавтопром", организованный в 1994 г. на базе двух установок SLA-250 и SLA-500 фирмы 3D-Systems Ltd. Центр на начальных этапах провел маркетинговую работу по демонстрации уникальных возможностей технологии быстрого прототипирования и оказанию кон-

салтинговых услуг российским предприятиям и научным организациям, в первую очередь ведущим автомобильным, авиационным и аэрокосмическим компаниям. К сожалению, из-за некомпетентности новых собственников ОАО "НИИТавтопром" и возникших финансовых проблем, связанных с необходимостью проведения регулярных технических юстировок лазерных установок, ЦБП был закрыт в 2006 г., а уникальное оборудование отправлено на склад. Специалисты, освоившие особенности и специфику послойного синтеза, вынуждены были перейти в другие родственные фирмы или учебные организации.

В рамках мероприятий деловой программы выставки прошел 2-й Международный инструментальный саммит "Проблемы конкурентоспособности российского рынка формообразующей оснастки и его интеграции во всеобщую экономическую систему". В течение трех дней в саммите приняли участие 180 специалистов из 18 регионов страны. С докладами выступили 45 российских и иностранных докладчиков, в том числе представители компаний DME, ООО "Фирма "ИМИД", ОАО "Завод "Прогресс", ЗАО "Техоснастка", HASCO, ООО "TECIC", ООО "Саланд-Д".

Интересные концептуальные доклады были представлены руководителями организаций и фирм, профессионально занимающихся проблемами быстрого прототипирования: ООО "АБ-Универсал", СЗАП "МСП Технолоджи Центр" (Минск). По материалам саммита был издан сборник тезисов и докладов.

Таким образом, выставка "Формы. Пресс-формы. Штампы" доказала в очередной раз свою актуальность и востребованность, а благодаря удачной концепции "от идеи через прототип к серийному производству" помогла сократить расстояние между разработчиками, изготовителями и пользователями изделий и услуг.

Е. С. Добринский, канд. техн. наук (АПК РФ)

Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 30.08.2007. Подписано в печать 16.10.2007. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 14,39. Заказ 11/07.

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"