Технология Машиностроения

ОБЗОРНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ, НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Гл. редактор
В. А. Казаков

Зам. гл. редактора
Н. В. Посметная

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

Редакция:
С. В. Богус,
Л. Т. Мартыненко,
Т. П. Маслик

Компьютерная верстка:
Е. В. Конова

Дизайн обложки:
Е. С. Благовидов

Специальные корреспонденты:
А. Н. Иванов, А. В. Казаков,
Ан. А. Суслов

Редактор-переводчик
Е. О. Егорова

Корректор
Т. В. Арбузова

10 (64)
Октябрь
2007

УЧРЕДИТЕЛЬ:
Издательский центр
"Технология машиностроения"
Журнал издается при содействии
Министерства промышленности
и энергетики РФ,
Министерства образования и науки РФ,
Российской инженерной академии,
Российского научно-технического
общества машиностроителей,
ОАО НПО «ЦНИИТМАШ»

Адрес для корреспонденции:
129626, Москва, а/я 01

Контактный тел.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru
(с пометкой для журнала
"Технология машиностроения")
Http://www.tm.folium.ru

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

© Издательский центр "Технология машиностроения", "Технология машиностроения", 2007

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУКЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Гурдин В. И., Жеребцов С. Н., Куценко А. И., Крупенков А. Н. — Способы повышения термической стабильности жаропрочных никелевых сплавов **5**

ЗАГОТОВИТЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Руцкий Д. В., Жульев С. И., Мозговой А. В., Титов К. Е. — Повышение качества и эффективности производства крупногабаритных полых изделий **8**

Жигуц Ю. Ю. — Алюминий, выплавляемый металлотермией **11**

ТЕХНОЛОГИИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ

Нежинский А. М. — Совершенствование технологии обработки поверхностей деталей машин методами поверхностно-пластического деформирования **14**

Рогов В. А., Малыгин В. И., Коломеец Н. П., Обловацкая Н. С. — Повышение качества поверхностного слоя изделий методом ультразвуковой финишной обработки **17**

Тарнопольский А. В. — Эффективность технологических процессов механической обработки при вихревом способе подготовки и подачи СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля **20**

СТАНКОСТРОЕНИЕ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Кресик Д. А. — Особенности использования инструментального обеспечения при работе многоцелевых центров, обрабатывающих криволинейные поверхности **23**

Петрушин С. И., Баканов А. А., Махов А. В. — Геометрический и силовой анализ сборных сверл со сменными многогранными пластинами **27**

Шаламов В. Г., Сметанин С. Д. — Совершенствование профилирования дискового инструмента при формообразовании винтовых поверхностей **30**

МЕХАНОСБОРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Железнов Г. С., Железнова С. Г., Шевляков М. А. — Оптимизация допусков на размеры гладких цилиндрических соединений **33**

ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ НЕРАЗЪЕМНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Штрикман М. М. — Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений. Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки **35**

ТЕХНОЛОГИИ МОДИФИЦИРОВАНИЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Сайфуллин Р. Н. — Прочность сцепления и пористость покрытий, полученных электроконтактной приваркой порошковых композиций **43**

СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ ТЕХНОЛОГИЙ

Хасанов З. М., Ахметзянов Р. Р. — Некоторые проблемы расчета и промышленного изготовления упругих чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков давления **46**

Слепцов В. В., Тянгинский А. Ю., Трепов Д. А., Церулев М. В. — Микроразряды высокой мощности в жидкости **54**

МЕТРОЛОГИЯ

Шевелев Ю. В., Малышев Ю. О. — Применение керамических труб в горизонтальной печи, эксплуатирующейся при температуре до 1600 °С **59**

ТЕХНИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА, НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ, ИСПЫТАНИЯ

Красильников С. Б., Сонин Г. И. — Рентгеновский радиометрический контроль кольцевых сварных соединений при строительстве магистральных газопроводов **61**

АВТОМАТИЗАЦИЯ И КОМПЬЮТЕРИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Калашников Д. Б. — Автоматизация расчета на прочность зубьев плоскоколесных передач с применением метода конечных элементов **67**

ПРОМЫШЛЕННАЯ ЭНЕРГЕТИКА

Рыбаков А. А. — Унифицированный энергомодуль бесперебойного электроснабжения **70**

Козлов Н. И., Семенов А. П., Рябов В. В., Шульженко Г. В. — Современные приборы контроля герметичности отечественного производства **73**

СТАНДАРТИЗАЦИЯ, СЕРТИФИКАЦИЯ, СИСТЕМЫ КАЧЕСТВА

Воздух рабочей зоны. Точность взвешивания аэрозольных проб (ГОСТ Р ИСО 15767—2007) **78**

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Кузнецов А. П. — Теоретическое обеспечение разработки программ технического развития производственных систем **82**

Соколов В. О., Куликов А. С. — Обеспечение эффективности машиностроительного производства средствами АСТПП **85**

Богоявленский-Храмов М. С. — Анализ и прогнозирование показателей качества в системах менеджмента качества **88**

ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ

Потапова Г. С. — Содержание зарубежных журналов **91**

ИНФОРМАЦИЯ

Иванов А. Н. — 7-я Международная специализированная выставка "Мир инструмента — 2007" **95**

Добринский Е. С., Сеин В. А. — Международная выставка "Автомеханика — 2007" **99**

TEKHNOLOGIYA MASHINOSTROENIYA

REVIEW-ANALYTICAL, SCIENTIFIC-TECHNICAL AND PRODUCTION JOURNAL

10 (64) October 2007

EDITORIAL BOARD:

V. A. Kazakov
Editor-in-Chief

N. V. Posmetnaya
Deputy Editor-in-Chief

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

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

Computerized making-up:
E. V. Konova

Cover design:
E. S. Blagovidov

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

Editor-translator
E. O. Egorova

Proof-reader
T. V. Arbuzova

FOUNDER:
Publishing Centre
"Tekhnologiya Mashinostroeniya"
Journal is published in collaboration with RF Ministry of Industry and Energetics, RF Ministry of Education and Science, Russian Engineering Academy, Russian Scientific-Technical Society of Machine Builders, TSNIITMASH, JSC

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

Tel.: (495) 796 2491

E-mail: tm@folium.ru
(marked for journal "Tekhnologiya Mashinostroeniya")
Http://www.tm.folium.ru

The journal is registrated 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

© Издательский центр "Технология машиностроения", "Технология машиностроения", 2007

CONTENTS

STRUCTURAL MATERIALS

Gurdin V.I., Zherebtsov S.N., Koutsenko A.I., Kroupenkov A.N. – Methods of nimonic thermal stability increase . . . 5

BLANK PRODUCTION

Rootsky D.V., Zhulyev S.I., Titov K.Ye., Mozgovoy A.V. – Upgrading and effectiveness increase of large dimension hollow articles production . . . 8

Zhigouts Yu.Yu. – Aluminium smelted by metallothermy . . . 11

FORMING TECHNOLOGIES

Nezhinsky A.M. – Technological advancement of machine elements surfacing by surface plastic deformation . . . 14

Rogov V.A., Malyguin V.I., Kolomeyets N.N., Oblovatskaya N.S. – Production surface layer refinement by ultrasonic mechanical polishing . . . 17

Tarnopolsky A.V. – Efficiency of machine work processes at vortical preparation and feeding of lubricating-and-cooling agents in the aerial-liquid spray . . . 20

TOOLING PRODUCTION

Kresik D.A. – Special usage of tooling at multipurpose machining units for curved surfaces cutting . . . 23

Petroushin S.I., Bakanov A.A., Makhov A.V. – Geometrical and force evaluation of removable-facet-plated build-up drills . . . 27

Shalamov V.G., Smetanin S.D. – Disk-tool shaping improvement at helical surface forming . . . 30

MACHINING-AND-ASSEMBLY PRODUCTION

Zheleznov G.S., Zheleznova S.G., Shevlyakov M.A. – On the improvement of dimensional tolerance for slick cylindrical joints . . . 33

PERMANENT JOINTS PRODUCTION TECHNOLOGY

Shtrikman M.M. – Upgrading of tooling and welding process flowsheet. Part 2 . . . 35

MODIFEING PROCESSES OF MACHINE PARTS SURFACES

Sayfoollin R.N. – Adhesive strength and porosity of coatings obtained by powder mixtures electrocontact welding . . 43

SPECIAL TECHNOLOGIES

Khasanov Z.M., Akhmetzyanov R.R. – On some problems of designing and commercial production of resilient sensing devices for fiber-optical pressure sensor . . . 46

Sleptsov V.V., Tyaguinsky A.Yu., Trepov D.A., Tseroolev M.V. – High-powered microcharges in fluids . . . 54

METROLOGY

Shevelev Yu.V., Malyshev Yu.O. – On the problem of using ceramic tubes in horizontal furnace up to 1600 °C 59

TECHNICAL DIAGNOSTICS, NONDESTRUCTIVE CHECK-AND-TESTING METHODS

Krasilnikov S.B., Sonin G.I. – X-Ray radiometric surveillance of circular welded joints at main gas-pipelines building 61

PROCESSES AUTOMATION AND COMPUTERIZATION

Kalashnikov D.B. – Finite element strength analysis automation for flat-wheel drive teeth . . . 67

POWER INDUSTRY

Rybakov A.A. – Standardized power module for constant power supply . . . 70

Kozlov N.I., Semenov A.P., Ryabov V.V., Shulzhenko G.V. – Tightness check modern devices of home manufacture . . . 73

STANDARDIZATION, CERTIFICATION, QUALITY SYSTEMS

Air in the working area**.** Weighing accuracy of aerosol assay (GOST R ISO 15767 – 2007) . . . 78

ECONOMICS AND PRODUCTION ORGANIZATION

Kuznetsov A.P. – Theoretical support for the manufacturing system technical development software design . . . 82

Sokolov V.O., Koolikov A.S. – Assurance of machine-building productive efficiency by means of generative planning system . . . 85

Bogoyavlensky-Khramov M.S. – Quality grades analysis and prediction in the systems of quality management . . . 88

FOREIGN EXPERIENCE

Potapova G.S. – Foreign journals contents . . . 91

INFORMATION

Ivanov A.N. – The 7th International specialized exhibition "ISET*'2007*" . . . 95

Dobrinsky Ye.S., Sein V.A. – International exhibition "*Automechanika'2007*" . . . 99

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

Способы повышения термической стабильности жаропрочных никелевых сплавов

Повышение надежности и ресурса работы лопаток, роторов для газотурбинных двигателей, изделий "сердечник рогообразный" [1] в большой мере зависит от повышения термической стабильности и механических свойств жаропрочных никелевых сплавов ЖС6-К, ЖС6-У, эксплуатируемых при высоких температурах в агрессивных средах. Химический состав данных сплавов после электрошлакового переплава следующий (%): 0,15 C; 9,2 Cr; 9,8 Co; 2,5 Ti; 5,3 Al; 1,1 Nb; 2,1 Mo; 0,025 Zr; 0,015 B (ЖС6-У); 0,18 C; 11,2 Cr; 4,8 Co; 2,8 Ti; 5,3 Al; 4,2 Mo; 0,03 Zr; 0,013 B (ЖС6-К).

Основной характеристикой жаропрочных никелевых сплавов является многокомпонентное и многофазное строение, а также трудность приведения их структуры к равновесному состоянию. В результате длительной выдержки при высоких температурах (отжига) происходит образование и рост новых фаз, неравномерно распределенных в сплаве, что, как правило, приводит к снижению прочностных и жаропрочных свойств изделия.

Кроме структурных факторов на термическую стабильность влияют кинетические факторы: скорость роста зерна, коагуляция и растворение фаз; диффузия атомов по границам и внутри зерна, изменение количества дефектов (дислокаций, вакансий); ползучесть и скорость деформации сплавов [2] в процессе их эксплуатации. Можно выделить также различные причины термической нестабильности сплавов. Большое значение для изучения влияния различных факторов имеет применение новейших высокочувствительных методов исследования, в частности сочетание электронной микроскопии с рентгеноспектральным анализом [3].

Установлено, что основными фазовыми составляющими сплавов являются твердый раствор на основе никеля, γ'-фаза, карбидные и боридные фазы. Проведенный литературный обзор показывает, что содержание алюминия в жаропрочных никелевых сплавах напрямую влияет на выделение γ'-фазы. Общее количество γ'-фазы мало изменяется в интервале 800—950 °С, однако при этом могут существенно изменяться ее размер и распределение [4]. Длительный отжиг при повышенной температуре приводит к изменению химического состава γ'-фазы, увеличению содержания хрома и титана, что обусловливается температурной зависимостью растворимости входящих в нее элементов. Эти изменения в химическом составе, а также морфологии и распределении γ'-фазы являются причиной изменения механических свойств сплавов как при комнатной, так и при высокой температуре. В связи с этим была поставлена задача исследования влияния длительного отжига на механические свойства сплавов ЖС6-К и ЖС6-У в зависимости от способа выплавки и режима термической обработки.

Проведенное исследование влияния времени отжига на прочностные и пластические свойства сплавов ЖС6-У и ЖС6-К показало четкую зависимость механических свойств сплавов от режима термической обработки.

Измеренные при температуре отжига значения механических свойств существенно различаются в случае применения высокотемпературного режима термической обработки. После закалки от 1210 °С прочность и предел текучести образцов уменьшаются с увеличением продолжительности отжига при 950 °С. Ускоренный процесс растворения и коагуляции γ'-фазы приводит к нарушению стабильности свойств сплава ЖС6-У, в частности снижению его прочностных свойств. Размер выделений γ'-фазы растет с увеличением продолжительности отжига и при 100 ч достигает 900—950 нм по сравнению с исходным 300—400 нм. Однако прочность того же сплава практически не меняется, если перед испытанием провести термическую обработку вблизи температуры испытания, в этом случае сплав имеет стабилизированную для температуры испытания структуру, что обусловливает постоянный уровень прочностных свойств.

С точки зрения изучения причин изменения стабильности свойств жаропрочных сплавов представляет интерес проведение исследований на изделиях, выплавленных по методу направленной кристаллизации сплава ЖС6У-НК (НК). В этом случае более высокие и стабильные механические

свойства обнаруживаются после проведения высокотемпературной термической обработки (нагрев до 1210 °С, выдержка 4 ч). Отжиг при 950 °С в начальный период приводит к изменению механических свойств. В то же время закаленные от 1210 °С образцы сплава ЖС6У-НК отличаются более высокими и стабильными механическими свойствами. Различное поведение литых и направленно закристаллизованных образцов сплава ЖС6-У после значительно различающейся по температуре термической обработки связано с влиянием развивающихся на границах зерен явлений, влияющих на механические свойства сплава, при этом создаются условия для неравномерного распределения химических компонентов сплава. На границах зерен имеет место преимущественное образование карбидов хрома $Me_{23}C_6$ и Me_7C_3, а также карбидов тугоплавких металлов (главным образом молибдена и вольфрама) МеС и Me_6C.

Повышенное содержание примесей и дефектов кристаллической решетки на границах зерен является причиной изменения имеющихся и образования новых фазовых выделений при длительном испытании. К ним относятся σ- и μ-фазы (фазы переменного состава), в которых по сравнению с твердым раствором в несколько раз меньше содержание никеля, но существенно возрастает количество молибдена, вольфрама, хрома, кобальта. Состав этих фаз в значительной мере отражает химический состав твердого раствора, образовавшегося после выделения γ'-фазы, а также карбидных и боридных фаз. Так как σ- и μ-фазы имеют упорядоченное строение и содержат пониженное количество никеля, то имеют повышенную склонность к охрупчиванию и являются нежелательными фазовыми компонентами в никелевых жаропрочных сплавах; наибольшее количество этих фаз образуется при длительном отжиге в интервале 850—950 °С.

Установлено, что при длительной выдержке изделий при высоких температурах и развивающихся явлениях на границах зерен основу их составляют диффузионные процессы. Многокомпонентное легирование приводит к существенному торможению диффузии легирующих элементов. При температуре около 1000 °С минимальную скорость диффузии имеют атомы железа (примеси), несколько бóльшую — хрома и еще большую — атомы основы сплава (никеля). С повышением температуры коэффициент диффузии примесных атомов увеличивается значительно быстрее, чем атомов основы или легирующих элементов, что находит отражение в максимальном значении энергии активации процесса диффузии для атомов примеси [2, 4].

В процессе исследований установлено, что минимальное значение коэффициентов диффузии легирующих атомов и примеси характерно для наиболее сложнолегированного жаропрочного никелевого сплава ЖС6-У. Так как диффузия химических элементов является основой развития процессов разрушения на границах и в объеме зерна при повышенных температурах, термическая стабильность жаропрочных никелевых сплавов будет возрастать с усилением легирования тугоплавкими элементами и увеличением количества γ'-фазы.

Разупрочнение сплава происходит вследствие перераспределения легирующих элементов вблизи границ зерен, в первую очередь это относится к наиболее подвижным элементам (атомам алюминия, титана, хрома и примесей), а также коагуляции и уменьшению количества γ'-фазы. Более высокая подвижность атомов вблизи границ обусловлена также повышенной плотностью дислокаций, а также бóльшей концентрацией дефектов.

Повышенная диффузионная подвижность атомов вблизи границ зерен определяет характер изменения механических свойств сплавов в процессе их эксплуатации. В этих областях раньше развиваются процессы разупрочнения сплава и очаги разрушения. В направленно закристаллизованных образцах действует другой механизм зарождения и развития очагов разрушения. Установленный противоположный эффект влияния времени отжига на прочностные свойства сплавов ЖС6-К, ЖС6-У и ЖС6У-НК является результатом различного механизма разрушения в этих сплавах [4]. В полученных обычным литьем образцах для повышения термической стабильности сплавов необходимо иметь на границах зерен термодинамически стабильное фазовое состояние, что и достигается термической обработкой при температуре, близкой к рабочей. В случае направленно закристаллизованных образцов прочность определяется главным образом размером и распределением γ'-фазы. Так как в образцах такого типа отсутствуют области с повышенной диффузионной подвижностью (малые границы зерен), для стабилизации фазового состояния температура отжига должна быть выше. Это подтверждено в процессе исследований, подтвердивших незначительное увеличение объема γ'-фазы в зависимости от времени отжига при температуре испытания 975 °С. Таким образом, образцы, получаемые обычным литьем и направленно закристаллизованные, имеют различную начальную структуру и разное количество дефектов, поэтому режим их термической обработки должен существенно отличаться. Конечная температура термической обработки образцов, полученных обычным литьем, должна быть близка к рабочей, при этом отжиг при высокой температуре оказывает меньшее воздействие на прочностные свойства и его в отдельных случаях можно исключить. В направленно закристаллизованных образцах стабилизация фазового строения происходит при существенно более высокой температуре, поэтому для них необходима высокотемпературная термическая обработка, а отжиг при температуре, близкой к рабочей, оказывает

незначительное воздействие. Только же низкотемпературная термическая обработка этих сплавов не стабилизирует фазового состояния, что приводит к снижению прочностных свойств сплава.

Так как диффузионные процессы являются ответственными за высокотемпературные явления в жаропрочных сплавах, то дальнейшее повышение их термической стабильности, а следовательно, и рабочей температуры можно обеспечить оптимизацией химического состава сплавов.

Жаропрочность никелевых сплавов при рабочих температурах в бóльшей степени зависит от количества γ'-фазы. При температурах выше 1000 °С для повышения их жаропрочности бóльшую роль играет вольфрам, а также гафний и ванадий, вводимые в количестве от нескольких десятых процента до нескольких процентов [5]. Для повышения жаропрочности и термической стабильности следовало бы вводить в никелевые сплавы такие металлы, как тантал и ниобий, характеризующиеся высокой температурой плавления и хорошими пластическими свойствами. Их применение способствует повышению жаропрочности с сохранением уровня пластичности изделия [2, 5].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Еремин Е. Н., Жеребцов С. Н., Радченко В. Г.* Электрошлаковая технология изготовления роговых сердечников для производства трубных отводов // Литейное производство. 2002. № 9. С. 29—31.
2. *Каблов Е. Н.* Литые лопатки газотурбинных двигателей (сплавы, технология, покрытия). М.: МИСИС, 2001. 632 с.
3. *Гольцев В. П., Дедегкаев Т. Т., Дергай А. М.* Рентгеноспектральный и электронно-микроскопический методы исследования структуры и свойств материалов. Минск: Наука и техника, 1980. 192 с.
4. *Каблов Е. Н., Голубовский Е. Р.* Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 464 с.
5. *Жеребцов С. Н.* Влияние добавок легирующих элементов на структуру, свойства и фазовый состав никелевого сплава // Литейщик России. 2006. № 4. С. 30—32.

РГУ

Внимание! Информация

ТЕРРИТОРИЯ НЕФТЕГАЗ

22-23 ноября 2007 г.

Международная конференция

СВАРОЧНЫЕ И РОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ, РЕКОНСТРУКЦИИ И РЕМОНТЕ НЕФТЕГАЗОПРОВОДОВ

ПРОГРАММА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Состояние и перспективные направления развития сварочных и родственных технологий для строительства, реконструкции и ремонта промысловых и магистральных газонефтепроводов.
2. Современные сварочные материалы, оборудование и технологии, регламентированные к применению при строительстве новых, реконструкции и ремонте находящихся в эксплуатации промысловых и магистральных газопроводов ОАО «Газпром», нефтепроводов ОАО АК «Транснефть».
3. Врезка отводов, перемычек, лупингов при ремонте газонефтепроводов под давлением без прекращения транспорта продукта с применением специального оборудования врезки и технологий сварки.
4. Ремонт дефектных участков труб и сварных соединений сваркой, наплавкой, заваркой, вваркой «заплат», приваркой патрубков, вантузов, стальными сварными муфтами газонефтепроводов, временно выведенных из эксплуатации или находящихся в эксплуатации под давлением с транспортировкой или без транспортировки продукта.
5. Современные технологии сварки при строительстве морских газонефтепроводов и ремонте находящихся в эксплуатации подводных переходов через реки.
6. Современные материалы, оборудование и методы неразрушающего контроля сварных соединений, регламентированные к применению при строительстве новых, реконструкции и ремонте находящихся в эксплуатации промысловых и магистральных газопроводов ОАО «Газпром», нефтепроводов ОАО АК «Транснефть».
7. Современное оборудование и методы размагничивания конструктивных элементов сварных соединений газонефтепроводов.
8. Оценка неразрушающими методами контроля напряженно-деформированного состояния отремонтированных сваркой, наплавкой, заваркой, вваркой «заплат», приваркой патрубков, вантузов, стальными сварными муфтами газонефтепроводов.
9. Методы снижения остаточных сварочных напряжений с применением термических и альтернативных технологий: отремонтированных сваркой, наплавкой, заваркой, вваркой «заплат», приваркой патрубков, вантузов, стальными сварными муфтами газонефтепроводов.
10. Перспективные методы защиты от наружной и внутренней коррозии сварных швов газонефтепроводов.
11. Современные методы диагностики для выявления потенциально опасных участков газонефтепроводов.
12. Жизнеобеспечение при проведении сварочных работ.
13. Нормативная база по сварке, родственным технологиям и неразрушающему контролю промысловых и магистральных газопроводов ОАО «Газпром», нефтепроводов ОАО АК «Транснефть».

Тел. для справок: +7 (495) 787 8529 e-mail: olga@neftegas.info

Д. В. РУЦКИЙ, канд. техн. наук, С. И. ЖУЛЬЕВ, д-р техн. наук, А. В. МОЗГОВОЙ, аспирант (ВолгГТУ),
К. Е. ТИТОВ, канд. техн. наук (ФГУП ПО "Баррикады")

Повышение качества и эффективности производства крупногабаритных полых изделий

С увеличением мощности аппаратов в тепловой и атомной энергетике возрастает потребность во все более крупных кованых заготовках — роторах турбогенераторов, корпусах реакторов и деталях вторичного контура, в том числе котельных трубах. При этом требования к качеству и однородности металла изделий постоянно возрастают. Особо ответственные изделия (корпуса реакторов, сосуды высокого давления и т. д.) изготовляют ковкой из слитков массой 12,0—140,0 т и более из конструкционных сталей. Наиболее опасные дефекты формируются на стадии кристаллизации слитков и трудно устранимы в процессе ковки, особенно крупногабаритных изделий. При этом заготовка наследует неоднородность исходного слитка, что может служить причиной ее преждевременного разрушения.

Цель данной работы — поиск рациональной формы удлиненного слитка для производства полых поковок как малой (1—5 т), так и большой (10—30 т) массы.

Традиционно используемые для ковки полых заготовок удлиненные слитки имеют меньшую химическую неоднородность, но их максимальная масса не превышает 13 т [1]. Это ограничение обусловлено трудностями при извлечении удлиненных слитков из высоких изложниц. Для полых поковок массой более 7 т используют кузнечные слитки нормальной геометрии (отношение высоты к среднему диаметру H/D = 1,5÷2,5), имеющие высокий уровень развития ликвации.

Было предложено [2] отливать сдвоенные удлиненные кузнечные слитки в составные из двух полуформ изложницы, сочленяемые со стороны наибольших внутренних диаметров. При этом в качестве полуформ использовали восьмигранные изложницы с H/D = 1,5÷3,5 для слитков массой 2,6—51 т.

После затвердевания слитки обычной геометрии (10 шт.) и сдвоенные прибыльные (10 шт.) были разорваны взрывом. На полученных сечениях исследовали химический состав металла. Пробы стружки отбирали сверлом диаметром 6 мм с горизонтов, соответствующих низу, середине и верху слитка (рис. 1).

Нижняя часть слитков характеризуется пониженным содержанием углерода. В верхней части содержание углерода повышено, что соответствует общепринятым представлениям о ликвации в слитках.

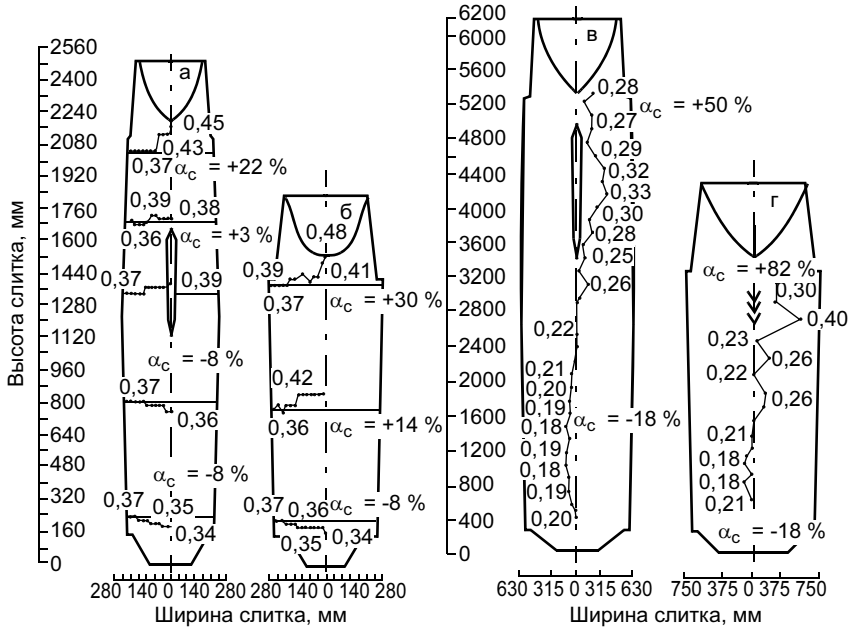


Рис. 1. Изменение содержания углерода по сечению и высоте сдвоенных и обычных прибыльных слитков из сталей 38ХН3МФА (*а*, *б*) и 20 (*в*, *г*):
а—г — масса слитков соответственно 2,99, 2,88, 50 и 51 т

С увеличением массы слитков степень ликвационной неоднородности по высоте и сечению возрастает. При этом в удлиненных слитках она в 1,5 раза менее развита (см. рис. 1).

Для установления корреляции между параметром H/D и ликвацией углерода, серы и фосфора данные химического анализа по распределению примесей в 20 слитках статистически обработаны и получены следующие уравнения:

$$\alpha_C = 168{,}48(H/D)^{-1{,}3643},\ R^2 = 0{,}78;\ (1)$$

$$\alpha_S = 207{,}17(H/D)^{-1{,}5503},\ R^2 = 0{,}65;\ (2)$$

$$\alpha_P = 305{,}73(H/D)^{-2{,}4639},\ R^2 = 0{,}70,\ (3)$$

где α_C, α_S, α_P — ликвация углерода, серы, фосфора, %, соответственно.

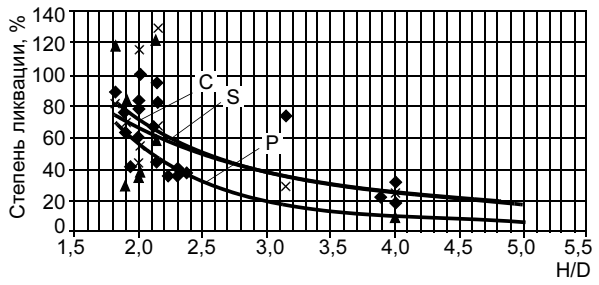


Рис. 2. Зависимость степени ликвации примесей от геометрии слитка (♦, ×, ▲ — ликвация углерода, серы и фосфора соответственно)

Независимо от марки стали с увеличением параметра *H*/*D* до 4 при неизменной массе ликвация этих примесей снижается в 1,5—3,0 раза (рис. 2).

Более высокую химическую однородность сдвоенных слитков по сравнению со слитками нормальной высоты можно объяснить тем, что они являются удлиненными и в них получает большее развитие зона последовательной кристаллизации, затвердевающая ускоренно (см. таблицу, зону столбчатых кристаллов). Поэтому после затвердевания зоны столбчатых кристаллов ликвационные процессы развиваются в меньшей степени из-за существенного уменьшения объема жидкого ядра.

На рис. 1 видно, что в слитках всех типов встречаются зоны положительной ликвации, располагающиеся, как правило, в верхней их части, отрицательной ликвации (нижняя часть слитка) и так называемая зона "нулевой" ликвации или ускоренного охлаждения (совпадающая с коркой и зоной столбчатых кристаллов — последовательной кристаллизации). Известно [1—4], что причиной отрицательной ликвации элементов в нижней части слитка является осаждение кристаллов, образующих конус мелких кристаллитов, который характеризуется пониженным содержанием в нем легко ликвирующих элементов (углерода, серы, фосфора). Эти оседающие кристаллы вытесняют обогащенный ликватами расплав в верхние горизонты слитка.

Масса слитка, т	*H*/*D*	Площадь охлаждающей поверхности, см^2	Площадь зон относительно осевого темплета, %				
			корковой	столбчатых кристаллов	конуса осаждения	различноориентированных дендритов	осевой
1,40	1,90	36 064	—	27	—	—	—
1,70	1,93	36 064	—	31	—	—	—
2,88	2,50	49 624	—	28	—	—	—
2,60*	4,00	72 128	3	42	5,7	45,4	3,9
2,99	4,00	72 128	3	45	9,2	39,5	3,3

* Бесприбыльный удлиненный сдвоенный слиток.

Зона положительной ликвации образуется из-за постепенного накопления примесей в объеме жидкого ядра, которое усиливается при замедленном росте глобулярных, различно ориентированных кристаллов. При росте данных кристаллов ликвирующие примеси накапливаются в жидкой фазе перед растущим фронтом кристаллизации слоем 6—8 мм, останавливая его продвижение вглубь жидкого ядра. Конвективные потоки расплава частично смывают ликвационный слой, перемешивая его с оставшимся расплавом. При этом прерванный рост глобулярных кристаллов возобновляется. При падении скорости роста усиливается формирование ликвационного слоя, смывание которого новыми конвективными потоками еще более способствует накоплению ликватов в незатвердевшей части слитка.

Процесс постепенного перемещения легкоплавких ликвирующих примесей в затвердевающем объеме жидкого ядра является причиной того, что в последних затвердевающих объемах металла слитка массой 51 т (см. рис. 1) содержание углерода в 1,82 раза выше, чем в исходном металле, и в 2 раза выше, чем в конусе осаждения.

С увеличением зоны столбчатых кристаллов (нулевой ликвации) (см. таблицу) уменьшается объем металла в слитке, затвердевающего замедленно, что сокращает общее содержание ликватов в нем и, как следствие, содержание легкоплавких примесей в затвердевающем последнем объеме расплава под прибылью. Так, в удлиненном сдвоенном слитке массой 50 т максимальное содержание углерода в 1,5 раза выше исходного, что на 32 % ниже, чем у слитка обычной геометрии (см. рис. 1).

Проводили отливку партии слитков обычной геометрии массой 24,2 т и сдвоенных прибыльных массой 42,26 т, причем в качестве верхней и нижней полуформ использовали нормальные изложницы от слитков массой 24,2 т. При этом из удлиненных слитков массой 42,26 т изготовляли удвоенное количество тех же толстостенных труб, что и из слитка массой 24,2 т (рис. 3). Степень проработки металла слитка при ковке всех заготовок одинакова. Пробы для исследования качественных характеристик металла отбирали из концевых дисков с первого (*Iк*) и второго (*IIк*) концов поковок, соответствующих донной и прибыльной частям слитка (рис. 4).

Химическая однородность заготовок, полученных из сдвоенных слитков, выше, чем полученных по обычной технологии. Ликвация по углероду снизилась в 4 раза, сере и фосфору — в среднем в 3 раза, а на некоторых поковках в 5 раз (см. рис. 3).

Результаты исследования макроструктуры показали, что она удовлетворяет стандартам качества. В кольцевых дисках, отобранных с противополож-

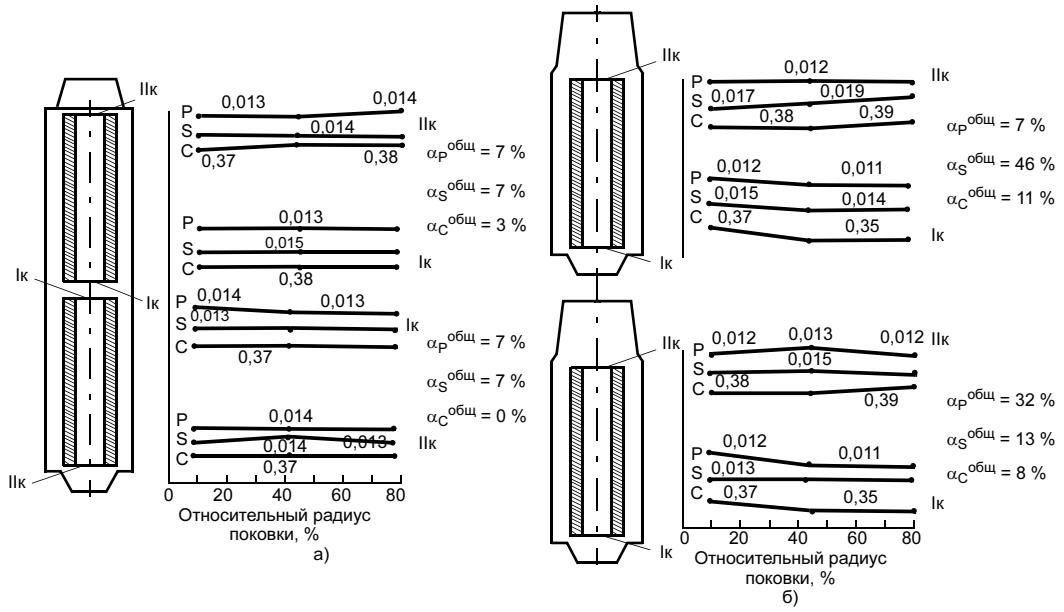


Рис. 3. Химическая неоднородность трубных заготовок из обычных (*а*) и сдвоенных (*б*) слитков

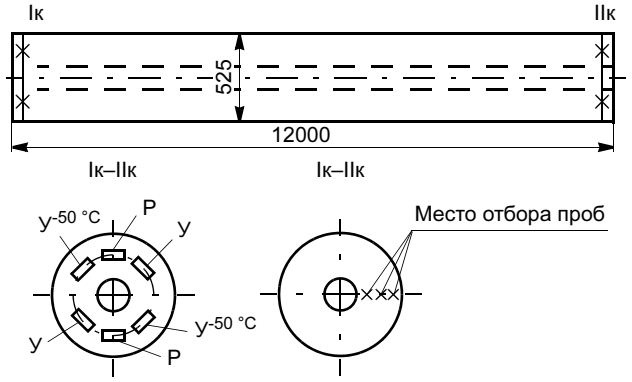


Рис. 4. Схема отбора проб металла для определения химического состава и уровня механических свойств (*У*, *У*$^{–50\ °C}$ — образцы, исследуемые на удар при 20 и –50 °С соответственно; *Р* — образцы, исследуемые на разрыв)

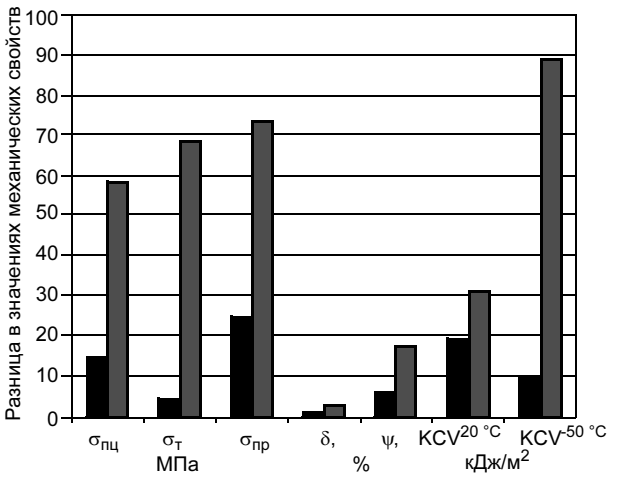


Рис. 5. Разница в значениях механических свойств поковок опытной (■) и сравнительной (■) плавок

ных концов заготовок, дефекты усадочного происхождения в виде трещин, пор и др. не обнаружены.

На рис. 5 приведена разница в механических свойствах поковок, изготовленных из сдвоенного прибыльного и обычного слитков. Наибольшее отклонение имеют пределы прочности $\sigma_{пц}$ и текучести $\sigma_т$, в заготовках сравнительных плавок их разница составляет около 70 МПа. Предел пропорциональности $\sigma_{пр}$ ~ 60 МПа. В поковках, изготовленных из удлиненных сдвоенных слитков, разброс механических свойств в 1,5—5,0 раз меньше, чем в обычных. Предел текучести имеет отклонение около 5 МПа, предел пропорциональности — около 15 МПа и предел прочности — 25 МПа. Заготовка, полученная из сдвоенного слитка, характеризуется ударной вязкостью, приблизительно в 5 раз меньшей, чем поковка из обычного слитка.

Результаты исследования показали, что удлиненный прибыльный слиток новой геометрии может быть использован для производства полых поковок с равномерным распределением углерода по их высоте и сечению.

На основе существующей литейной оснастки разработаны 13 типоразмеров слитков массой от 9,0 до 143 т. Удлиненные слитки имеют высокий параметр *H*/*D*, который изменяется от 3,8 до 4,42, конусность верхней и нижней частей 3,2—4,7 %. Сдвоенные слитки имеют объем прибыльной части в 3 раза меньше (от 5,5 до 9,24 %), в традиционно используемых слитках нормальной высоты он составляет 16,4—23,1 %.

Применение удлиненных сдвоенных прибыльных слитков при производстве толстостенных полых труб позволяет повысить выход годного металла в поковку на 12,2 %.

ВЫВОДЫ

1. Отливка слитков в сдвоенные изложницы обеспечивает более равномерное распределение химических элементов по высоте и сечению заготовок, их химическая однородность повышается в 4 раза по сравнению с заготовками из обычных слитков, однородность механических свойств в опытных изделиях — в 1,5—5,0 раз.

2. Однородная по химическому составу поковка упрощает режим окончательной термической обработки и исключает необходимость проведения термических переработок крупногабаритных изделий, изготовляемых из слитков большой массы.

3. Применение сдвоенного слитка массой 42,26 т для получения трубных длинномерных заготовок позволило повысить выход годного металла в поковку на 12,2 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Скобло С. Я., Казачков Е. А.* Слитки для крупных поковок. М.: Металлургия, 1973. 247 с.
2. *Слитки* для крупных поковок / С. И. Жульев, А. П. Фоменко, Д. Н. Федоров и др. // Сталь. 2005. № 11. С. 41—44.
3. *Жульев С. И., Зюбан Н. А.* Производство и проблемы качества кузнечного слитка. Волгоград: ВолгГТУ, 2003. 168 с.
4. *Лебедев В. Н., Коровина В. М., Варакин П. И.* Крупные поковки для валов турбогенераторов. М.: Машиностроение, 1968. 120 с.

Ю. Ю. ЖИГУЦ, канд. техн. наук
Ужгородский национальный университет (Украина)

Алюминий, выплавляемый металлотермией

Введение. При изучении и усовершенствовании технологий синтеза металлов и сплавов в результате проведения экзотермических реакций [1—6] возникла задача получения жидкого алюминиевого сплава с последующим исследованием его механических свойств и использованием в литейном или сварочном производстве.

Исходные материалы, методы исследования образцов и компоновки металлотермической шихты. При компоновке металлотермической шихты использовали алюминиевый порошок ПА-3—ПА-4 (ГОСТ 6058—73), калиевую и натриевую селитры. Испытание на прочность проводили на образцах, изготовленных из центральной нижней части полученных отливок.

Основу процесса плавки алюминия составляют классические экзотермические реакции, основанные на окислении алюминия селитрой. Для определения состава шихты разработали методику его расчета на основе стехиометрического соотношения компонентов данных реакций [7]. Методика позволяет установить не только состав металлотермической шихты, но и одновременно рассчитать адиабатическую температуру ее горения.

Для определения массы синтезированного металлического слитка и выхода сплава из шихты были проведены микроплавки при массе шихты от 100 до 300 г в металлотермическом реакторе[1] диаметром 80 мм с разным процентным соотношением компонентов в смеси. Инициирование процесса горения проводили специальным запалом из порошка титанового химического ПХ-2 (ТУ 48-10-78—83) массой 3—5 г. Порошковую шихту просушивали при 150—180 °С, смешивали, уплотняли и после этого размещали в металлотермическом реакторе. При проведении исследований использовали порошковые ингредиенты металлотермической шихты, часть из которых изготовляли из отходов металлорежущего производства (помол алюминиевой стружки). Прочность измеряли на пропорциональных цилиндрических коротких образцах диаметром 6 мм и длиной 30 мм (ГОСТ 1497—73).

Теоретические и экспериментальные исследования. Автором были проведены металлотермические микроплавки, основанные на взаимодействии алюминия с калиевой и натриевой селитрами (алюминий и селитра в виде порошка) по следующим схемам:

$$6KNO_3 + 10Al = 5Al_2O_3 + 3K_2O + 3N_2\uparrow, \qquad (1)$$

$$\Delta H^0_{298} = -6525 \text{ кДж};$$

$$6NaNO_3 + 10Al = 5Al_2O_3 + 3Na_2O + 3N_2\uparrow, \qquad (2)$$

$$\Delta H^0_{298} = -6843 \text{ кДж}.$$

Первоначально реакции (1) и (2) проводились при стехиометрическом соотношении составляющих ингредиентов (%): 69,18 KNO_3; 30,82 Al для реакции (1) и 65,38 $NaNO_3$; 34,62 Al для реакции (2). В результате горения должен был образоваться только шлак, однако образовался небольшой слиток алюминия (табл. 1, вариант *2*) — возможно, из-за неравномерности протекания процесса реагирования компонентов в шихте. Состав шлака в соответствии с теоретическим расчетом (%): для реак-

[1] Патент 2005 03319 (Украина).

Таблица 1

Показатель		Номер микроплавки							
		1	2*	3	4	5	6	7	8
Компонент шихты в расчете на 100 г	$NaNO_3$ Al	70 30	65 35	60 40	55 45	50 50	45 55	40 60	35 65
Масса алюминиевого слитка, г	1 2 3	0** 0** 0**	3,0 2,5 2,0	8,5 8,2 8,4	10,8 10,6 10,0	12,5 12,0 12,9	14,1 14,6 14,8	17,0 17,5 17,3	20,0 21,0 20,0
Средняя масса алюминиевого слитка, г		0**	2,5	8,37	10,47	12,47	14,50	17,23	20,33
Количество Al, необходимого для реакции (1) при стехиометрическом соотношении компонентов, г		—	35,92	33,22	30,45	27,69	24,91	22,15	19,22
Избыток Al в реакции (по отношению к рассчитанному теоретически), г		—	0,92	6,78	14,55	22,31	30,09	37,85	45,78
Фактический выход Al, г		—	—	123,3	71,96	55,89	48,19	45,63	44,40

*Разделение металла и шлака не происходит.
**Стехиометрическое соотношение компонентов.

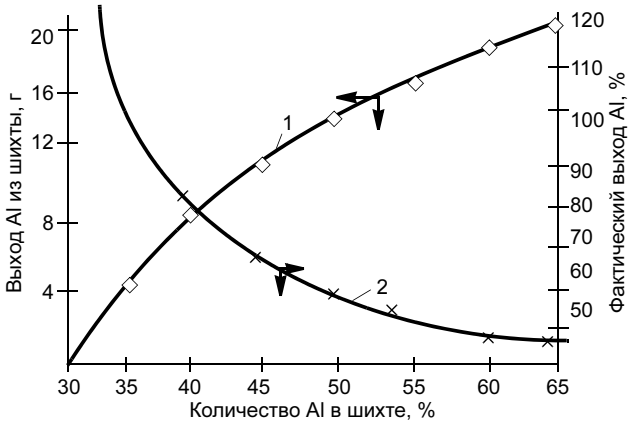


Рис. 1. Зависимость выхода Al из шихты: *1* — выход металла, полученный расчетным путем; *2* — экспериментальный выход металла в сравнении с расчетным (%)

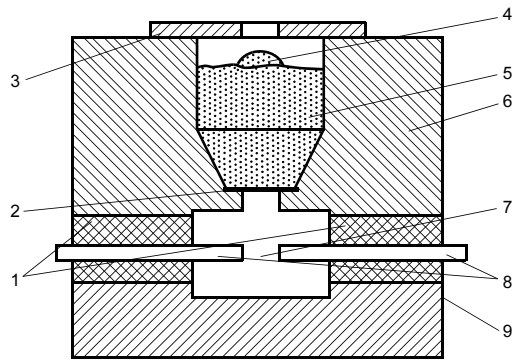


Рис. 2. Принципиальная схема сварки алюминиевых проводов: *1* — огнеупорный материал в зажимном приспособлении; *2* — алюминиевая пластина (толщиной 0,5 мм); *3* — крышка (с отверстием в центре для выхода газов); *4* — титановый запал для поджигания шихты; *5* — экзотермическая смесь (в насыпном виде); *6* — верхняя полуформа для проведения термитной сварки; *7* — место сварки; *8* — свариваемые алюминиевые провода; *9* — нижняя полуформа

ции (1) — 35,61 K_2O и 64,39 Al_2O_3; для реакции (2) — 26,72 Na_2O и 73,28 Al_2O_3. Структура шлака пористая, он сохраняет форму тигля, легко крошится и имеет светло-серый оттенок.

Высокую экзотермичность реакции было решено направить на разогрев избыточного алюминия, вводимого в состав шихты, и перевод его в жидкое состояние. При этом было необходимо учесть два обстоятельства: во-первых, чем больше в шихте избыточного алюминия, тем больше выход металлического слитка. С другой стороны, избыточный алюминий "охлаждает" экзотермическую реакцию и при определенном соотношении ее составляющих реакция вообще не будет протекать или будет проходить в режиме "тления" — без разделения металлической и шлаковой фаз, а металлический алюминий в виде "корольков" распределится по всему объему шлака. Для определения изменения массы получаемого металлического слитка и выхода металла из шихты были проведены микроплавки с различным процентным соотношением компонентов в смеси (см. табл. 1, рис. 1).

При получении алюминиевого слитка за критерий оптимальности экзотермической реакции выбраны масса слитка и выход (%) металла из шихты — отношение реально полученного металла к теоретически рассчитанному. Установлено, что оптимальным является соотношение составляющих ингредиентов шихты в вариантах 5—7 (см. табл. 1).

Жидкий алюминий в вариантах микроплавки № 5—7 хорошо отделяется от шлака и может быть залит в литейную форму или использован для сварки алюминиевых токопроводов с помощью приспособления, приведенного на рис. 2, приме-

няемого как для термитной сварки рельсов и других деталей[2], так и алюминиевого кабеля.

В вариантах микроплавок № 1—6 (см. табл. 1) по мере увеличения содержания Al в шихте наблюдается плавное увеличение массы алюминиевого слитка одновременно со снижением полноты разделения металла и шлака. Содержание Al в шихте свыше 70 % приводит к протеканию реакции без разделения шлаковой и металлической фаз. Для повышения плавности прохождения реакции и уменьшения скорости горения металлотермической шихты было предложено ввести в состав шихты дополнительно помол стружки алюминия (или алюминиевого сплава соответствующего состава), что снижает температуру реакции, увеличивая одновременно выход сплава из шихты за счет использования вторичных отходов металлообрабатывающего производства.

Использование в реакциях (1) и (2) вместо алюминия магния, а также частичная замена им алюминия более чем на 7 % приводят к нестабильности получения результатов, а при значительном содержании магния — даже к взрыву из-за его высокой активности и частичного перехода в паровую фазу при горении.

Применение при компоновании шихты стружки алюминиевого сплава (предварительно подготовленной) позволило получить плотный алюминиевый слиток с высокими механическими свойствами, несмотря на некоторое снижение коэффициента активности алюминия в расплаве. При замене алюминиевого порошка стружкой высокая экзотермичность реакции позволяет проплавлять ее в объеме до 150 % от массы Al в шихте. Полученный в металлотермическом тигле алюминиевый расплав должен отстояться (5—10 с) для более полного отделения от шлака и выхода из слитка образующихся в результате реакции газов (в основном N_2). Механические свойства полученного технического алюминия приведены в табл. 2.

Микроструктура получаемого металла более мелкозернистая за счет модифицирования Na (или K), который попадает из экзотермической шихты в его расплав. Во всех случаях в результате горения экзотермической шихты выделялось значительное количество дыма, что требует специальных мер по его отводу при проведении реакций в помещении. Данным способом были получены небольшие алюминиевые отливки и проведена прочная и надежная сварка алюминиевых проводов по схеме, приведенной на рис. 2. При горении экзотермической шихты алюминиевая пластина *2* прожигается и металл сливается в камеру сваривания.

Как известно, особенность металлотермических реакций состоит в простоте перехода от лабораторных экспериментов к промышленному производству, при этом в больших объемах значительно улучшаются процессы горения металлотермической шихты и ее показатели. Таким образом, экспериментально полученный выход металла 68,6 % может быть увеличен при проведении плавок в реакторах с бóльшим объемом загружаемой шихты.

Таблица 2

Материал	Механические свойства металлотермического алюминия				
	$\sigma_в$	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ	*HB*
	МПа		%		
Алюминий экзотермических плавок[1]	75	25	38	75	22
АД технический (отожженный)	80	30	35	80	25

[1]Твердость по Бринеллю определяли при нагрузке 5 кН шариком диаметром 10 мм.

ВЫВОД

Механические свойства алюминиевого сплава, полученного в процессе экзотермической реакции, отличаются от свойств сплава, получаемого традиционным методом. Ударная вязкость первого на 10—15 % выше, что объясняется более мелкозернистой структурой алюминиевого сплава, модифицированного Na или K. Исследования также показали возможность и целесообразность использования экзотермической шихты для выплавки таким способом литейного сплава любой марки и последующего его использования для термитной сварки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жуков А. А., Жигуц Ю. Ю., Шилина Е. П.* Комбинированная поверхностная обработка лазерным поверхностным упрочнением и самораспространяющимся высокотемпературным синтезом // Известия вузов. Черная металлургия. 1998. № 5. С. 60—63.
2. *Zhiguts Yu.* Some Permanent Joints Obtained with the Use of SHS. Modern Foundry Technologies — Environmental Protection // Wydzial Odlewnictwa Academii Gorniczo-Hutniczej Stowarzyszenie Techniczne Odlewnicow Polkich. Kracow, 2000. P. 213—215.
3. *Жигуц Ю. Ю., Похмурский В. И.* Получение бронзовых отливок с использованием экзотермических реакций // Процессы литья. 2003. № 1. С. 37—41.
4. *Zhiguts Yu. Yu.* Thermit amelting of cooper alloys // Acta Metallurgica Slovača. 1999. N 5. P. 418—421.
5. *Zsiguc J. J., Pohmurszkij V. I., Fedák V. V.* Exotermikus keverékek alkalmazása a bronz hidrosürüségének növelésére // Müszaki Szemle. 2005. N 29. O. 38—42.
6. *Жигуц Ю. Ю.* Високоміцний чавун для термітного зварювання заготовок // Восточно-европейский журнал передовых технологий. 2005. № 1 (13). С. 56—58.
7. *Жигуц Ю., Широков В.* Методика розрахунку складу екзотермічних шихт на основі термохімічного аналізу // Машинознавство. 2005. № 4. С. 48—50.

[2] Патент 253051 (Украина).

А. М. НЕЖИНСКИЙ, канд. техн. наук
Курганский государственный университет

Совершенствование технологии обработки поверхностей деталей машин методами поверхностно-пластического деформирования

Среди разнообразных методов поверхностно-пластического деформирования (ППД) достаточно перспективным является дорнование отверстий различной формы, стабильно обеспечивающее точность 6—7-го квалитетов, а в ряде случаев даже 5-го квалитета. При этом шероховатость обрабатываемых поверхностей по параметру *Ra* обеспечивается в пределах 0,63—0,10 мкм. Кроме того, поверхность обработанных отверстий приобретает повышенные эксплуатационные свойства (прочность, износостойкость и др.).

Точность и качество обработанных отверстий в значительной степени зависят от величины натяга *i*, материала заготовки, размеров (диаметра отверстия *d*, длины *l* и толщины стенки *b*), точности и параметра шероховатости предварительной обработки отверстия, смазочно-охлаждающей жидкости и др. Однако методик по выбору и назначению рациональных режимов деформирования, конструктивных параметров дорна, а также силовых характеристик недостаточно. Зачастую при дорновании отверстий не обеспечивается стабильность требуемых показателей качества в течение срока службы инструмента.

Как правило, операция окончательной обработки отверстий дорнованием выделяется в самостоятельную и требует дополнительных затрат на универсальное и специальное оборудование. Все это приводит к снижению производительности и эффективности процесса.

Кинематика процесса дорнования не обеспечивает из-за остаточных деформаций обработанного отверстия свободного выхода инструмента при возвратном ходе. Вместе с тем необходимость свободного выхода инструмента на исходную позицию для подготовки нового рабочего цикла очевидна, особенно в условиях автоматизированного производства. В процессе дорнования может развиваться большая скорость рабочего хода инструмента (скорость ограничивается технологическими возможностями применяемого оборудования) и затрачивается много времени при холостом ходе (возврате на исходную позицию), что существенно снижает эффективность метода и затрудняет его автоматизацию.

Данный недостаток вынуждает выделять процесс дорнования в отдельную операцию и не позволяет включать его в качестве перехода при работе оборудования с программным управлением.

Исследования, проведенные на кафедре "Технологии машиностроения" Курганского государственного университета, показали, что применение окончательной обработки отверстий дорнованием в условиях автоматизированного производства возможно при соблюдении следующих требований:

- процесс должен протекать с относительно небольшими натягами, чтобы исключить значительное деформирование металла;
- для закрепления дорна необходим специальный патрон, позволяющий инструменту самоустанавливаться по обрабатываемому отверстию детали;
- необходима специальная заточка деформирующих элементов дорна, позволяющая обеспечить стабильность показателей качества обработанного отверстия;
- ориентация инструмента относительно обрабатываемого отверстия при дорновании шлицевых отверстий.

Доказано, что процесс дорнования можно реализовать на станках с ЧПУ, в том числе многоцелевых станках ИР 320ПМФ4, 2254ВМФ4. В этом случае дорнование применяется вместо менее производительных методов раскатывания или тонкого растачивания деталей типа корпусов.

Деформирующие элементы применяемых дорнов, как правило, изготовляют из легированных сталей ХВГ и ШХ15, азотируемых сталей 35ХЮА и 38ХМЮА, быстрорежущей стали Р6М5, а также твердого сплава ВК8.

Исследования изнашивания деформирующих элементов дорнов позволили выработать рекомендации по обеспечению размерной и технологической стойкости инструмента, увеличению сроков его службы, а следовательно, стабильности показателей качества обработки, в том числе в условиях автоматизированного цикла работы.

На основании анализа перенаклепа поверхности и наростообразования назначаются рациональные режимы деформирования, геометрия и конструкция инструментов.

Сокращение величины холостого хода инструмента и его автоматизацию при дорновании можно осуществлять по двум направлениям. Первое — проектирование специальных станков с автоматическим циклом работы. Примеры таких станков в машиностроении имеются. Такой путь является дорогостоящим и достигает основной цели — повышения

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 10

производительности труда. Второе направление — изменение конструкции инструмента с целью обеспечения возможности свободного возврата в исходное положение. Примером конструкции таких инструментов могут служить дорны для обработки гладких глухих отверстий[1]. Подобные конструкции позволяют осуществить свободный выход дорна из обработанного отверстия при обратном ходе.

Приведенные мероприятия позволяют существенно повысить производительность при дорновании отверстий деталей машин в условиях автоматизированного производства.

Если сравнить цикловую $Q_ц$ и технологическую K производительности операции дорнования в традиционном варианте, получаем очень низкий коэффициент производительности

$$\eta = \frac{Q_ц}{K} = \frac{t_р}{t_р + t_х},$$

где $t_р$ — производительно затрачиваемое время рабочего хода; $t_х$ — время, затрачиваемое на холостые ходы.

Применительно к процессу дорнования, когда соотношение длительности холостого и рабочего ходов достигает значительной величины, производительность зависит в большей мере от времени $t_х$. Если учитывать внецикловые потери, снижение производительности еще больше. Необходимая эффективность может быть получена только за счет сокращения времени холостых ходов, что вызывает затруднения при традиционном варианте дорнования.

Изменение технологии дорнования, уменьшение величины холостых ходов можно обеспечить свободным возвратом инструмента через обработанное отверстие. Такую сокращенную траекторию инструмента можно получить, изменив его конструкцию. Новый дорн для обработки шлицевых отверстий имеет возможность свободного выхода через обработанное отверстие на исходную позицию. Это достигается благодаря тому, что деформирующие элементы устанавливают в корпусе свободно и под действием сил трения они могут автоматически занимать соответствующие положения при рабочем и холостом ходах инструмента. При рабочем ходе инструмента деформирующие элементы входят в контакт с обрабатываемой поверхностью, занимая положение, при котором инструмент имеет максимальный рабочий диаметр. При выходе инструмента диаметральный размер его уменьшается за счет изменения положения деформирующих элементов. Таким образом, становится возможным свободный возврат дорна на исходную позицию по кратчайшей траектории при минимальной нагрузке на привод подач и механизм крепления.

Конструкция инструмента позволяет также легко заменить деформирующие элементы при выходе его из строя в результате изнашивания и других причин, что расширяет технологические возможности и увеличивает срок службы дорна в целом. При введении унификации дорнующего кольца и оправки подбирают соответствующий типоразмер деформирующего элемента, можно также разработать конструкцию дорна необходимого размера. Такая конструкция инструмента выгодно отличается от инструмента с жестким креплением деформирующих элементов.

Применение подобных инструментов исключает при холостом ходе большие усилия, уменьшает неблагоприятное воздействие на механизм крепления детали, инструмента и механизма подач, что подтверждает реализацию автоматического цикла дорнования на оборудовании с ПУ.

Проведенные исследования показали, что применение окончательной обработки отверстий дорнованием по автоматическому циклу вполне возможно. Кроме того, увеличивается срок службы дорна и становится возможной обработка глухих отверстий, ранее проблематичная. В научно-технической литературе имеется описание конструкции специальных дорнов для обработки гладких глухих отверстий, которые можно использовать в автоматизированном цикле.

Предлагаемые инструменты позволяют совмещать процесс ППД с обработкой резанием как один из переходов операции на многоцелевом станке. Обработка деталей без переустанова повышает точность обработки. Новые инструменты позволяют расширить применение методов ППД при обработке отверстий в корпусных деталях. При этом повышаются точность отверстий (обработка без переустанова) и качество поверхностного слоя.

Автоматизация процесса дорнования, перевод операции на оборудование с ПУ возможны при соблюдении некоторых условий:

- процесс ППД должен осуществляться с небольшими относительными натягами, чтобы исключить возникновение больших сил деформирования металла, осевых тяговых сил, на которые не рассчитаны механизмы привода подач и крепления инструмента. Например, усилие затяжки инструмента в шпинделе станка ИР 320 не превышает 1500 Н;
- для обеспечения угловой ориентации шлицевого инструмента относительно обрабатываемого отверстия необходимо установить размерные связи шлицев на чертеже детали и оправке инструмента, что было необязательным при ручном ориентировании. Шпиндель станка должен иметь фиксированное положение по углу поворота (нулевое у станка ИР 320), в котором и происходит обработка дорнованием;
- для закрепления дорна в шпинделе необходимо применение специального патрона, позволяю-

[1] А. с. 941036, 372040 (СССР).

щего корректировать угловую ориентацию инструмента.

Наилучшие показатели точности и качества обработанной поверхности обеспечиваются дорнованием отверстий при относительных натягах i/d = = 0,006÷0,01. При этом тяговые усилия не превышают 5000—9000 Н. Мощности приводов подач, механизмов крепления инструмента вполне обеспечивают такие усилия дорнования.

К упрочняющим технологическим процессам относятся термические, химико-термические, физические методы обработки, наплавка сверхпрочными материалами и сплавами и др. Весьма эффективными оказались процессы обработки металлов поверхностным и объемным пластическим деформированием, обеспечивающие путем пластического деформирования металла не только упрочнение поверхностного слоя, но и значительное повышение точности обработки и снижение параметров шероховатости поверхности. В ряде случае точность и прочность деталей увеличиваются в 2—15 раз, износостойкость — в 1,5—5 раз. При этом значительно возрастает производительность труда, достигается большая экономия металла, упрощается процесс обработки, создаются условия для его механизации и автоматизации.

Точность обработанных дорнованием отверстий в основном определяется величиной радиальной остаточной деформации, возможными искажениями образующей отверстия, изменениями формы торцев и отверстия обрабатываемой деталей и др.

Определение остаточной деформации металла, характеризующей точность размера отверстия при дорновании, изложено в научно-технической литературе.

При дорновании на поверхности торцев детали образуются наплывы металла, равные по высоте $\Delta_т$, при этом образующая отверстия на концах детали отклоняется от прямой линии на величину $\Delta_{обр}$.

По мере продвижения деформирующего элемента сопротивление стенки детали в осевом и радиальном направлениях выравнивается, поэтому образующая отверстия становится прямолинейной. При этом осевые силы уравновешиваются, а радиальные, действуя на стенку детали, создают в ней остаточные деформации. Отклонения образующей от прямолинейности и наплыв металла на опорном торце возникают при выходе деформирующего зуба дорна из отверстия детали.

Экспериментальные данные показали, что при дорновании отверстий в режимах полуупругого периода и полной перегрузки остаточная деформация по отверстию у поверхности торцев примерно равна полной деформации. Таким образом, в данной зоне происходит беспрепятственное течение металла на величину натяга дорнования i в сторону наименьшего сопротивления. При таком условии искажение образующей отверстия можно определить из зависимости

$$\Delta_{обр} = \delta_{r_1} - (\delta_{r_1})_{ост},$$

где $\Delta_{обр}$ — искажение радиальной образующей отверстия у поверхности торца; δ_{r_1} — полная абсолютная деформация по радиусу отверстия, равная $\frac{i}{2}$; $(\delta_{r_1})_{ост}$ — абсолютная радиальная остаточная деформация в прямолинейной части отверстия;

Длину искаженного участка $l_{иск}$ образующей отверстия можно определить с достаточной степенью точности из условия упругопластического равновесия тонкого кольца под действием равномерного давления по краю отверстия.

Сопротивление металла в осевом и радиальном направлениях выравнивается после прохода дорном пути, примерно равного толщине пластически деформированного слоя металла $\delta_{пл}$.

Практика показала, что длина искаженного участка образующей отверстия после дорнования несколько меньше толщины пластически деформированного слоя металла $l_{иск} < \delta_{пл}$ из-за действия сил трения в зоне контакта дорна с обрабатываемой поверхностью и сил сопротивления течению металла в сторону свободного торца.

Экспериментально установлено, что уменьшение длины искаженного участка образующей отверстия составляет около 25 %. Таким образом, длину искаженного участка образующей отверстия можно принять $l_{иск} = 0{,}75\delta_{пл}$.

В режиме полной перегрузки при дорновании тонкостенных деталей длина искаженного участка образующей отверстия может быть принята равной толщине стенки $B_{ст}$ обрабатываемой детали $l_{иск} = B_{ст}$. При обработке отверстий многозубыми дорнами натяг распределяется между несколькими деформирующими зубьями. Пластическая волна и радиальная сила, создаваемые каждым отдельным зубом, значительно меньше по сравнению с однозубым дорном такого же натяга. Кроме того, каждый последующий зуб многозубого дорна работает по упрочненному предыдущими зубьями слою металла, который оказывает большее сопротивление его течению в осевом направлении. Следовательно, искажения образующей отверстия и формы торцев будут меньшими.

Так, при дорновании втулок из стали 45 с диаметром отверстия 21 мм и наружным диаметром 40 мм однозубым дорном с натягом от 0,1 до 0,4 мм искажения образующей отверстия $\Delta_{обр}$ изменялись от 0,015 до 0,05 мм. При обработке отверстий аналогичных втулок с такими же натягами четырехзубыми дорнами искажение образующей составило 0,01—0,025 мм.

Исследования показали, что по мере увеличения числа деформирующих зубьев дорна искажения образующей отверстия и формы торцев детали уменьшаются.

При назначении оптимальных натягов при дорновании отверстий искажения образующей составят 0,005—0,03 мм, распространяясь в осевом направлении на $l_{иск}$ = 1÷3 мм. Искажение формы торцев $\Delta_т$ = 0,01÷0,05 мм.

Искажения образующей отверстия и формы торцев детали существенного влияния на работоспособность детали не оказывают, а в ряде случаев облегчают сборку и смазку подвижной пары.

Таким образом, за счет сокращения холостого хода и его автоматизации повышается производительность операции дорнования отверстия. Применение многозубого дорна уменьшает искажения образующей отверстия формы торцев детали, что повышает точность обработанных дорнованием отверстий.

В. А. РОГОВ, д-р техн. наук
(Российский университет дружбы народов),
В. И. МАЛЫГИН, д-р техн. наук, Н. П. КОЛОМЕЕЦ, канд. техн. наук, Н. С. ОБЛОВАЦКАЯ, аспирант
(Филиал Санкт-Петербургского государственного морского университета "СЕВМАШВТУЗ")

Повышение качества поверхностного слоя изделий методом ультразвуковой финишной обработки

Повышение эксплуатационной надежности элементов сложных технологических систем остается актуальным для изделий современного машиностроения, особенно работающих в условиях агрессивных сред, кавитации, экстремальных температурных режимах и др. Наряду с другими факторами, определяющими работоспособность изделий, немалое значение имеет и качество поверхности элементов механических систем.

Сравнительный анализ технологических методов обработки поверхностей свидетельствует о том, что метод ультразвуковой финишной обработки (УФО) в наибольшей степени позволяет изменять параметры поверхностного слоя. В то же время методики, позволяющие назначать технологические режимы обработки для достижения необходимых критериальных значений качества поверхности изделий из различных обрабатываемых материалов, отсутствуют.

Цель данной работы — определение зависимости качества поверхности изделий из низкоуглеродистых легированных сталей от режимов и параметров ультразвуковой безабразивной обработки. Поставленную задачу решали с помощью теоретических и экспериментальных исследований. Теоретико-экспериментальные исследования заключались в определении совокупного влияния технологических факторов обработки на качество получаемого методом УФО поверхностного слоя. Использовали основные положения теории упругости, технологии металлов и металловедения. Методика исследования предполагала использование опытно-промышленного ультразвукового технологического комплекса (рис. 1) мощностью 0,25 кВт и рабочей частотой 22 кГц. Сравнительно небольшое значение рабочей мощности комплекса при его высокой эффективности связано с применением в качестве охладителя инструмента воздуха давлением 0,2—0,4 МПа.

Как свидетельствует опыт ФГУП "ПО "Севмаш" и ФГУП "МП "Звездочка", определенный интерес представляет оценка влияния различных факторов, возникающих при обработке деталей, на эксплуатационные качества обрабатываемых поверхностей изделий из низкоуглеродистых легированных сталей, поэтому в каче-

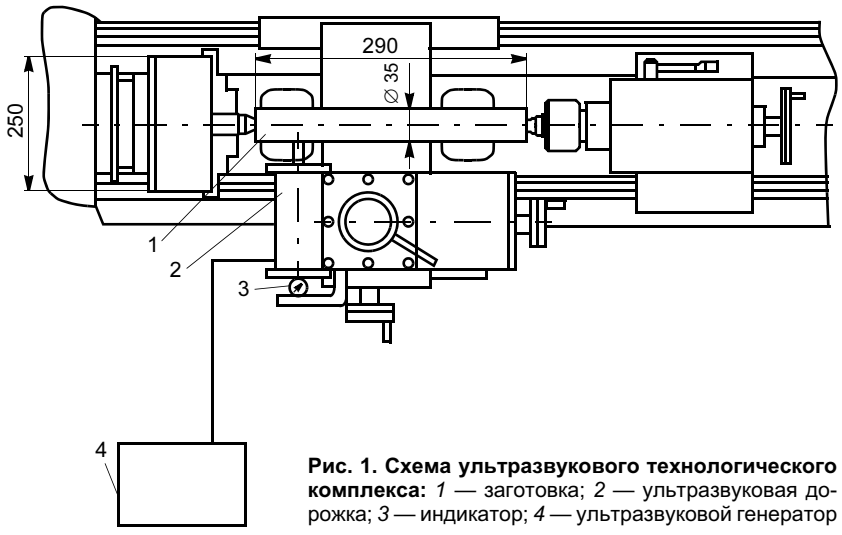


Рис. 1. Схема ультразвукового технологического комплекса: *1* — заготовка; *2* — ультразвуковая дорожка; *3* — индикатор; *4* — ультразвуковой генератор

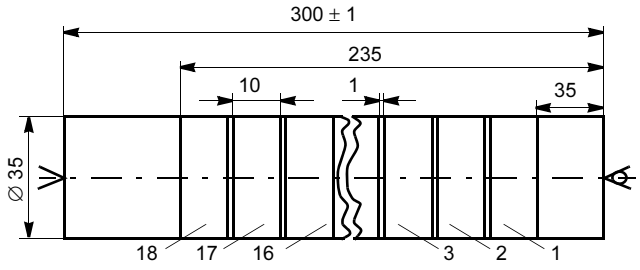


Рис. 2. Образец для определения оптимальных режимов обработки: *1—18* — участки поверхности

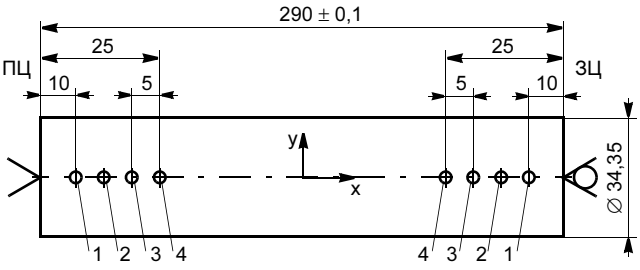


Рис. 3. Образец с пятнами контакта от индентора при $P_{ст}$, равном 46 (*1*), 91 (*2*), 136 (*3*) и 182 (*4*) Н

стве материалов исследуемых образцов применяли широко используемые стали 08Х18Н10Т, 17Х18Н9 и 20Х1М1Ф1ТР. Исходными параметрами образцов приняты диаметр 35 мм, длина 300 мм, параметр шероховатости Ra = = 2÷2,5 мкм.

В процессе анализа предыдущих исследований и литературных источников, а также экспериментальных данных определяли граничные значения диапазонов режимов обработки (см. таблицу).

Методика определения показателей качества поверхности предполагала определение изменения шероховатости поверхности заготовки, обработанной резанием; определение шероховатости поверхности, получаемой после ультразвуковой безабразивной обработки; определение зависимости шероховатости по длине детали с учетом изменения жесткости.

Ультразвуковую обработку (выглаживание) проводили на каждом из 18 участков поверхности в соответствии с рис. 2.

С помощью профилометрического прибора Surtronic-3 замеряли шероховатость на поверхности, полученной обработкой резанием, и на выглаженных поверхностях.

Сталь	Параметры режима обработки		
	Усилие прижима P, Н	Подача S, мм/об	Число оборотов n, об/мин
20Х1М1Ф1ТР	80—160	0,05—0,125	63—125
17Х18Н9	80—160	0,04—0,2	125—710

После измерения шероховатости образец снова устанавливали в станок и протачивали для удаления наклепанного слоя (снимали 0,4 мм на диаметр). После этого цикл повторялся до тех пор, пока диаметр образца не достигал 32 мм (снижение скорости обработки на 10 % по сравнению с диаметром 35 мм) или изнашивался индентор и начиналось микрорезание.

Для получения более значимой модели процесса ультразвукового выглаживания в рамках работы дополнительно исследовали влияние электроакустических параметров ультразвуковой системы, статического усилия прижима и геометрии индентора на глубину его внедрения. Глубину внедрения инструмента в заготовку определяли опытным путем с помощью цифрового микроскопа по геометрии пятен контакта, линейные размеры пятна измеряли в программе Adobe Photoshop 5.0 и пересчитывали в действительный размер (определяли отношение полученных размеров отпечатка к увеличению микроскопа). После измерения рассчитывали глубину внедрения индентора.

Эксперименты проводили на образце из стали 40Х (рис. 3) с исходным параметром шероховатости поверхности Ra = 3 мкм индентором с радиусом 10 мм, а также на образце из стали 08Х18Н10Т (Ra = 1,65 мкм — у заднего центра и Ra = 1,2 мкм — у переднего центра) индентором с радиусом 10 мм, а также на образце из стали 08Х18Н10Т (Ra = 1,4 мкм — у заднего центра и Ra = 0,7 мкм — у переднего центра) индентором с радиусом 6 мм.

Согласно рис. 3, в каждом из указанных сечений при неизменном статическом усилии получали пять пятен контакта (соответственно на *1—4*-й ступенях регулировки мощности генератора и без включения генератора), равномерно распределяя их по диаметру в соответствующем сечении.

На рис. 4 приведена последовательность проведения экспериментов, т. е. распределение рядов пятен контакта (см. рис. 3) по диаметру образца. Точки *1—4* соответствуют разным ступеням регулирования мощности, в точке *5* генератор не включали.

В результате экспериментов получили математическую зависимость для определения глубины внедрения индентора, определяемую его формой, статическим усилием прижима и мощностью генератора (динамическая глубина внедрения). Глубина внедрения инструмента в деталь в гори-

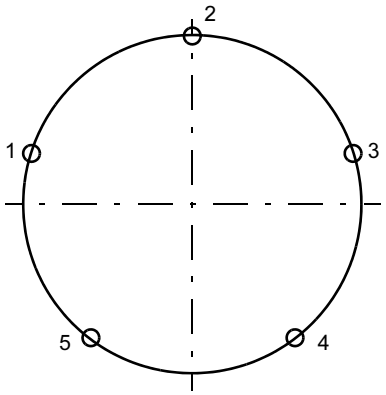


Рис. 4. Расположение пятен контакта на образце

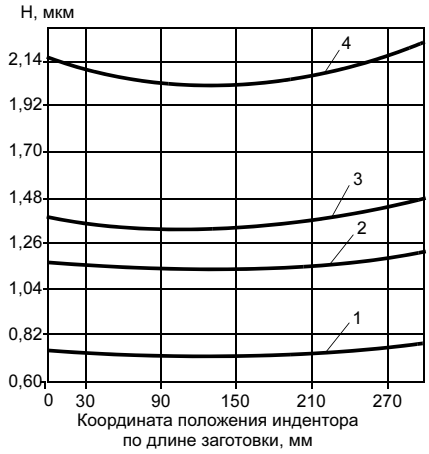


Рис. 5. Изменение глубины внедрения индентора: *1*, *2* — сталь 20Х1М1Ф1ТР; *3*, *4* — сталь 08Х18Н10Т (радиус индентора равен 6 (*2*, *4*) и 10 (*1*, *3*) мм

зонтальной плоскости по отпечатку (по оси *X*)

$$h_г = R_{иг} - \sqrt{R_{иг}^2 - \frac{B_{ог}^2}{4}},$$

в вертикальной плоскости по отпечатку (по оси *Y*)

$$h_в = \left(R_{ив} - \sqrt{R_{ив}^2 - \frac{B_{ов}^2}{4}}\right) + \left(R_д - \sqrt{R_{иг}^2 - \frac{B_{ов}^2}{4}}\right),$$

средняя глубина внедрения инструмента в заготовку

$$h_{ср} = \frac{h_г + h_в}{2},$$

где $R_{иг}$, $R_{ив}$, $R_д$ — радиусы инструмента в горизонтальной и вертикальной плоскостях и точке внедрения индентора соответственно; $B_{ог}$, $B_{ов}$ — размер отпечатка в горизонтальной и вертикальной плоскостях соответственно.

Пренебрегая твердостью микронеровностей и считая поверхности контактирующих тел абсолютно гладкими, а индентор абсолютно твердым и исходя из определения твердости по Бринеллю, определяем площадь контакта индентора и цилиндрической заготовки, возникающую в результате действия статической силы $P_{ст}$:

$$\Delta S_{ст} = \frac{P_{ст}}{9{,}81HB}.$$

Зная площадь контакта, находим статическую глубину внедрения $h_{ст}$.

В процессе УФО индентор совершает колебания, амплитуда которых зависит от статического усилия прижима индентора к заготовке и мощности ультразвукового генератора. Амплитуда колебаний индентора

$$A = h_к - h_{ст},$$

где $h_к$ — глубина внедрения индентора в ультразвуковом поле.

График зависимости глубины внедрения индентора от его геометрии, обрабатываемого материала и жесткости технологической системы приведены на рис. 5. Зависимость глубины внедрения индентора от мощности генератора (с наложением ультразвука) на 1—4-й ступенях приведены на рис. 6. Уменьшение амплитуды на 4-й ступени генератора связано с его недостаточной мощностью при статическом усилии прижима. На рис. 7 приведены зависимости амплитуды колебаний индентора от величины статического усилия при различной мощности генератора.

По результатам измерений строим зависимость глубины внедрения индентора от статической силы прижима при изменении радиуса индентора и его положения по длине обрабатываемой поверхности (рис. 8).

В процессе экспериментальных исследований установлена зависимость изменения исходной шероховатости поверхности образцов, подвергаемых УФО, от координаты положения инструмента (рис. 9).

План проведения исследований по выбору рациональных режимов ультразвуковой финишной обработки основывается на методе линейно-регрессионного анализа данных. План эксперимента представляет собой план Хартли—Коно для числа факторов $p = 4$. По данному плану проводили 18 экспериментов по ультразвуковому выглаживанию на различных режимах. Анализ данных исследования шероховатости поверхности после ультразвуковой обработки проводили с

Рис. 6. Изменение глубины внедрения индентора при наложении ультразвуковых колебаний: *1—4* — см. рис. 3

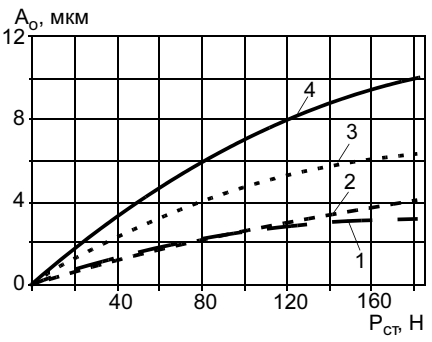


Рис. 7. Зависимость амплитуды колебаний индентора от статической силы: *1—4* — см. рис. 3

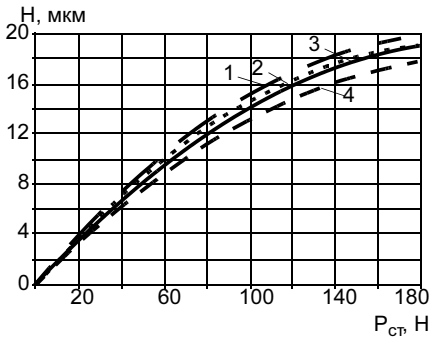


Рис. 8. Зависимость глубины внедрения индентора от статической силы прижима при радиусе индентора *6* (*1*, *4*) и 10 (*2*, *3*) мм

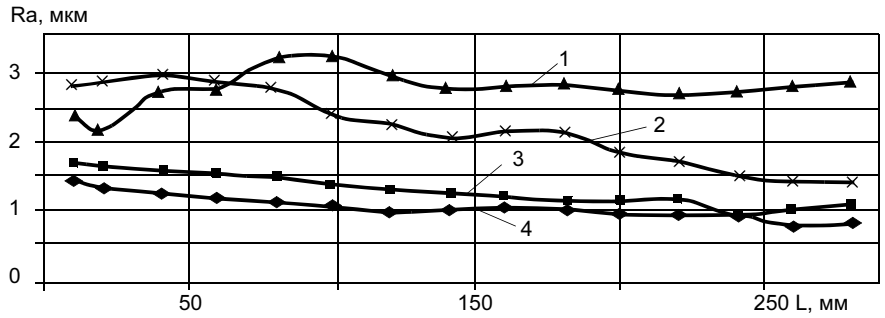


Рис. 9. Изменение параметра шероховатости поверхности образца по длине заготовки из сталей 20Х1М1Ф1ТР (*1*, *4*) и 17Х18Н9 (*2*, *3*): *1*, *2* — исходная шероховатость поверхности; *3*, *4* — после УФО

применением компьютерной системы электронных таблиц Microsoft Excel, содержащей пакет регрессионного анализа данных. Пакетом предсказывается значение шероховатости для каждого опыта и определяются коэффициенты уравнения регрессии, по которым составляется математическая модель:

для стали 17Х18Н9Т

$$Ra = 0{,}3268 + 0{,}77178S - 0{,}00159F - 0{,}0000031N^2 + 0{,}000000198\upsilon F;$$

для стали 20Х1М1Ф1ТР

$$Ra = 0{,}41495 + 0{,}13944S + 0{,}00671F + 0{,}00233N - 3 \cdot 10^{-6}\upsilon F + 0{,}01345SN - 4 \cdot 10^{-5}FN,$$

где S — подача; F — усилие прижима индентора к заготовке; N — мощность генератора; υ — скорость вращения заготовки.

Таким образом, выполненный комплекс лабораторных исследований и производственных испытаний позволил установить зависимости получаемой шероховатости поверхности материалов от режимов обработки (скорости вращения детали и подачи инструмента), шероховатости от усилия статического прижима индентора, глубины внедрения индентора от его геометрии, а также установить влияние формы индентора и площади контакта индентора с деталью на получаемую шероховатость и разработать модель изменения шероховатости поверхности под влиянием режимов ультразвуковой обработки.

Проведенные исследования позволяют разрабатывать рабочие технологические процессы при применении УФО в производственном процессе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Горохов В. А.* Улучшение эксплуатационных свойств деталей и инструмента методами вибронакатывания и вибровыглаживания. М.: ЦП НТО Машпром, 1983. 61 с.
2. *Киричек А. В., Соловьев Д. Л., Лазуткин А. Г.* Технология и оборудование статико-импульсной обработки поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2004. 288 с.
3. *Крагельский И. В., Добычин М. Н., Комбалов В. С.* Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.
4. *Марков А. И., Устинов И. Д.* Ультразвуковое алмазное выглаживание деталей и режущего инструмента. М.: ЦП НТО Машпром, 1979. 54 с.
5. *Марков А. И.* Ультразвуковое резание труднообрабатываемых материалов. М.: Машиностроение, 1968. 365 с.
6. *Марков А. И.* Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237 с.
7. *Шнейдер Ю. Г.* Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 240 с.

А. В. ТАРНОПОЛЬСКИЙ, канд. техн. наук
Пензенский государственный университет

Эффективность технологических процессов механической обработки при вихревом способе подготовки и подачи СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля

Смазывающе-охлаждающие технологические среды (СОТС) все более широко применяют в виде воздушно-жидкостного аэрозоля [1]. Аэрозоли смазочно-охлаждающих жидкостей в воздухе представляют полидисперсную гетерогенную систему, в которой дисперсной фазой являются движущиеся капли жидкости. При многофазной подаче СОТС появляется возможность совместно и в полной мере реализовать охлаждающее, смазывающее, химическое, режущее и моющее действия, характерные для СОТС различных типов. Физико-технические свойства аэрозолей СОТС существенно отличаются от свойств как воздуха, так и исходных жидкостей, подвергаемых распылению [2, 3]. Разработана новая технология вихревой подготовки и подачи в зону резания воздушно-жидкостного аэрозоля с использованием вихревых диспергаторов-распылителей[1] [4].

[1] Патент 2234986 (РФ).

Эффективность действия аэрозоля СОТС во многом зависит от кинетической энергии частиц жидкости ($E = mv^2/2$), переносимых воздушным потоком. Более высокая скорость частиц жидкости обеспечивает их проникновение в зону резания. Увеличение размера частиц жидкости незначительно увеличивает их кинетическую энергию, но увеличение скорости повышает кинетическую энергию частицы на квадрат скорости, что существенно влияет на эффективность действия СОТС.

Скорость потока аэрозоля зависит от давления сжатого воздуха, подаваемого в вихревой диспергатор-распылитель. Оптимизация режимов распыления жидкости позволит обеспечить подготовку и подачу потока воздушно-жидкостного аэрозоля в зону контакта резца и обрабатываемой заготовки и одновременно свести к минимуму эффект "слез" — склонности к образованию капелек смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на поверхности станка, инструмента, детали и оснастки. Исходя из этого, при проведении исследований определяли влияние условий подготовки и подачи в зону резания распыленной СОТС на интенсивность изнашивания режущих инструментов. Износ инструмента оценивали по величине контактной площадки на задней поверхности инструмента с использованием инструментального микроскопа.

Анализировали зависимость стойкости торцовой фрезы из быстрорежущей стали Р6М5 при обработке заготовки из стали 45 и подаче в зону резания воздушно-жидкостного аэрозоля 3 %-ной эмульсии НГЛ-205, приготовленного вихревым диспергатором-распылителем. Зависимость стойкости инструмента от давления сжатого воздуха, подаваемого в вихревой диспергатор-распылитель, и, соответственно, скорости потока аэрозоля приведена на рис. 1.

С увеличением давления сжатого воздуха растет кинетическая энергия струи распыляемого аэрозоля, при этом возрастает стойкость инструмента. Однако повышение давления сжатого воздуха свыше 0,3 МПа не приводит к заметному росту стойкости инструмента, так как начинает сказываться влияние пристеночных течений, возникающих на поверхности заготовки и инструмента. При этом мелкие капли аэрозоля отводятся от зоны резания и осаждаются на оборудовании или испаряются, образуя туман и загазованность. Поэтому можно рекомендовать при вихревом способе подготовки и подачи аэрозолей СОТС обеспечивать работу вихревого диспергатора-распылителя сжатым воздухом давлением не более 0,3 МПа.

Затем определяли степень влияния на износ инструмента традиционно применяющегося способа подачи СОЖ поливом и технологии подготовки и подачи распыленной СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля, приготовленного с использованием вихревого диспергатора-распылителя.

В качестве СОЖ использовали 3 %-ную водную эмульсию НГЛ-205. Для работы вихревого диспергатора-распылителя использовали сжатый воздух давлением 0,25 МПа. Обработку проводили на режимах: скорость резания 160 м/мин, глубина резания 4 мм, подача 0,5 мм/об. Подача СОТС в распыленном виде существенно снижает износ твердосплавного инструмента по сравнению с подачей СОЖ поливом (рис. 2).

Увеличение износа резца по задней поверхности при подаче распыленной эмульсии происходит медленнее, чем при подаче СОЖ поливом, что способствует повышению стойкости инструмента. Применение аэрозоля СОТС кроме охлаждающего действия обеспечивает хорошее смазочное действие, уменьшающее износ. Характер износа при этом мало отличается от характера износа при подаче СОЖ поливом. Время работы резца до его предельного износа увеличивается до 3 раз по сравнению с обработкой при подаче СОЖ поливом.

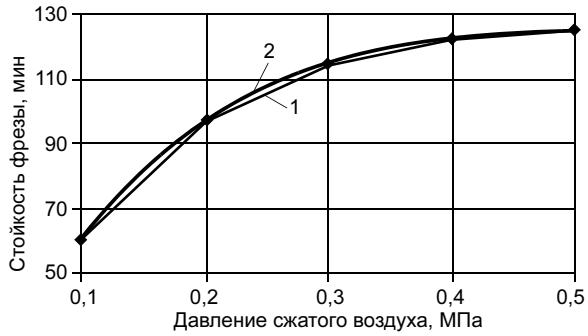


Рис. 1. Зависимость стойкости инструмента от давления сжатого воздуха в вихревом диспергаторе-распылителе: *1* — экспериментальная; *2* — полиномиальная $T = 1{,}2833x^3 - 17{,}079x^2 + 78{,}838x - 2{,}96$; $R^2 = 0{,}9998$

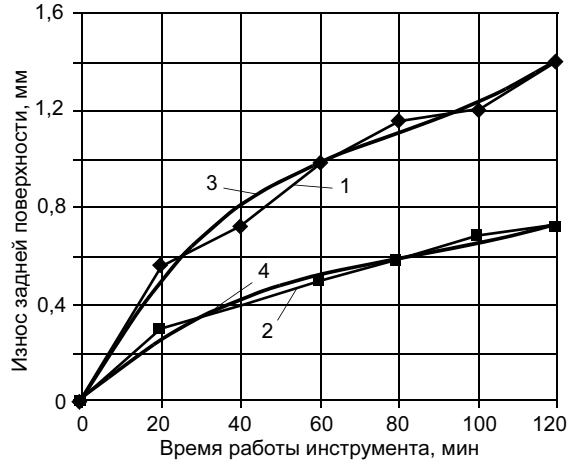


Рис. 2. Зависимость износа резца Т15К6 от времени работы при точении стали 45 и подаче СОЖ поливом (*1*, *3*) и распылением (2, *4*): *1*, *2* — экспериментальная; *3*, *4* — полиномиальная (*3* — $h1 = 0{,}0092x^3 - 0{,}1396x^2 + 0{,}824x - 0{,}6729$, $R^2 = 0{,}9903$; *4* — $h2 = 0{,}0053x^3 - 0{,}0775x^2 + 0{,}4437x - 0{,}3571$, $R^2 = 0{,}9923$)

Вихревая технология подготовки и подачи распыленных СОТС весьма эффективна и на операциях фрезерования. В отличие от операций точения при фрезеровании зона контакта режущего инструмента и заготовки значительно больше, поэтому при подаче аэрозолей СОТС необходимо обеспечивать больший расход СОЖ и перекрывать зону резания.

На рис. 3 приведена зависимость износа задней поверхности зубьев фрезы, оснащенной пластинками твердого сплава Т15К6, от времени работы. Обрабатывали заготовку из стали 45, при этом скорость резания составляла 400 м/мин, глубина резания — 2 мм, подача — 0,12 мм/зуб. В качестве охлаждающей жидкости применяли 5 %-ную водную эмульсию НГЛ-205, скорость подачи распыляемой жидкости составляла 150 мл/ч. Обработку проводили без подачи СОЖ, с подачей СОЖ поливом и при подаче аэрозоля СОТС. Распыление осуществляли при подаче в вихревой диспергатор-распылитель сжатого воздуха давлением 0,3 МПа.

Результаты сравнения износа задней поверхности зубьев фрезы при обработке без СОЖ и при подаче СОЖ показали, что в последнем случае стойкость инструмента значительно выше. Применение вихревой технологии подготовки и подачи распыленной СОТС до 100 % повышает стойкость твердосплавной фрезы.

Подача СОТС традиционным способом полива более дорогостоящая по сравнению с вихревым распылением. Проведено непосредственное сравнение на операциях фрезерования, где сначала СОТС подавали способом полива, а затем — вихревого распыления. В первом случае потребовалось 2 л СОЖ, во втором — менее 200 мл при выполнении той же операции. Когда такое малое количество смазки подается в зону резания, не образуется воздушный туман, обеспечивается безопасность оператора. Концентрация капель жидкости в осевой зоне факела аэрозоля позволяет доставлять 90 % распыляемой СОЖ в зону резания. При металлообработке скорость подачи масла, превращающегося таким образом в аэрозоль, не превышает обычно 8 мл/ч. Этого достаточно для значительного снижения трения режущей кромки инструмента с обрабатываемым материалом, а у материалов с высокой адгезионной способностью — для предотвращения налипания стружки на режущую кромку инструмента.

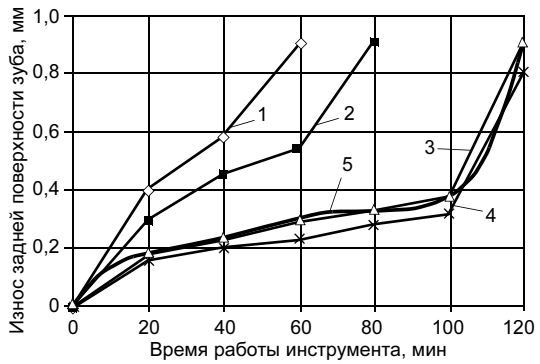


Рис. 3. Зависимость износа зубьев торцовой фрезы Т15К6 от времени работы при фрезеровании стали 45: *1* — фрезерование без СОЖ; *2* — подача СОЖ поливом; *3*, *4* — то же, диспергатором-распылителем соответственно со скоростью подачи 150 и 250 мл/ч; *5* — полиномиальная зависимость $T = 0{,}0025x^5 - 0{,}0448x^4 + 0{,}3116x^3 - 1{,}0367x^2 + 1{,}707x - 0{,}94$; $R^2 = 0{,}9997$

Таким образом, высокая эффективность применения вихревого способа подготовки и подачи СОТС в виде воздушно-жидкостного аэрозоля объясняется повышением их физической и химической активности. Совместная подача в зону резания воздуха, содержащего кислород, и жидкости интенсифицирует процесс образования оксидных пленок на трущихся поверхностях, что уменьшает износ инструмента. При многофазной подаче СОТС появляется возможность совместно и в полной мере реализовать охлаждающее, смазывающее, химическое, режущее и моющее действия, характерные для СОТС различных типов. Активация СОТС при вихревом диспергировании и распылении повышает эффективность действия их смазочных и химических свойств. Применение вихревой системы подготовки и подачи в зону резания СОТС в виде струи холодного воздуха и струи воздушно-жидкостного аэрозоля обеспечивает повышение стойкости инструмента в 2—3 раза за счет эффективного охлаждения зоны резания и смазки трущихся поверхностей в зоне контакта инструмента и заготовки при значительном уменьшении количества СОЖ.

Кроме экономии на стоимости жидкости, вихревое распыление имеет и другие преимущества. Получение сухой стружки улучшает качество отходов. Доля остатков СОЖ на стружке составляет менее 0,3 %, при этом не требуется дополнительной очистки стружки при ее утилизации. Поскольку распыляемые смазки составляют менее 1 % объема воздушно-жидкостного аэрозоля СОТС, то вихревая технология подготовки и подачи исключает расходы на удаление жидкости с поверхности заготовки, оборудования, инструмента и стружки, а также утилизацию СОЖ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Потапов В. А.* Применение механической обработки с минимальным количеством СОЖ на германских заводах // Машиностроитель. 1999. № 11. С. 46—52.
2. *Бердичевский Е. Г.* Смазывающе-охлаждающие средства для обработки материалов: Справочник. М.: Машиностроение, 1984. 224 с.
3. *Клушин М. Н., Тихонов В. М., Троицкая Д. Н.* Охлаждение и смазка распыленными жидкостями при резании металлов. Горький: Волго-Вятское кн. изд., 1988. 123 с.
4. *Тарнопольский А. В.* Технология подготовки и подачи распыленных смазывающе-охлаждающих жидкостей // Технологическое обеспечение надежности и долговечности машин. Ижевск: ИПМ УО РАН, 2006. С. 236—240.

Д. А. КРЕСИК, аспирант
МГТУ "Станкин"

Особенности использования инструментального обеспечения при работе многоцелевых центров, обрабатывающих криволинейные поверхности

В условиях развития рыночной экономики при организации работы промышленных предприятий главным фактором является сокращение времени обработки и увеличение прибыльности, что достигается при повышении производительности. В современных условиях организации металлообработки один из основных путей реализации этих целей — использование многоцелевых обрабатывающих центров, интегрирующих возможности различных групп станков, а также применение высокопроизводительных режимов резания. Внедрение данных режимов вызывает определенные сложности у технологов в связи с недостаточностью информационного обеспечения и отсутствием теоретической базы для расчета.

В данной работе на примере комплексного фрезерования тел вращения с криволинейными плоскостями с использованием токарно-фрезерных центров демонстрируются новые возможности обработки.

Для решения задач технологической подготовки производства необходимо отработать на технологичность конструкцию изделий, разработать технологические процессы, выбрать тип оборудования, спроектировать обработку в CAM-системе, запрограммировать ЧПУ станка, подобрать стратегию обработки и рассчитать режимы резания (рис. 1).

При обработке одной и той же детали могут быть применены различные варианты технологического процесса, равноценные с точки зрения технологических требований к изделию, но имеющие различные экономические показатели.

При выборе оборудования рассматривают два варианта: применение универсального оборудования или токарно-фрезерных центров. При выборе универсального оборудования для обработки детали сложной формы может потребоваться большое количество станков и соответствующее количество переустановов, что приведет к повышению трудоемкости и снижению качества. При выборе токарно-фрезерных центров стоимость оборудования может оказаться выше. Но применение такого оборудования позволяет сократить количество установов, что снижает погрешности при переустановке, сокращает затраты на разработку приспособлений и время обработки.

Программирование технологии обработки деталей сложной формы на токарно-фрезерных центрах является трудоемким процессом. Для эффективного применения станков такого уровня, современного инструмента и новейших подходов в стратегии обработки используют CAM-системы. Для реализации всех возможностей станка многие производители закладывают CAM-систему в стойку ЧПУ.

На данном этапе развития общего машиностроения станки, применяемые для обработки сложных криволинейных поверхностей тел вращения, можно разделить на три основные группы общего применения:

— токарные центры с возможностью дополнительной установки приводных станций для осевого инструмента;

— фрезерные центры с возможностью увеличения координат обработки до четырех или пяти осей;

— токарно-фрезерные центры с четырьмя и более координатами осей (Multi Task Centre).

Рассмотрим группу токарно-фрезерных центров для обработки сложных криволинейных поверхностей тел вращения.

Возможности обработки: обработка деталей типа эксцентрик; обработка коленвалов, распредвалов; выборка карманов на поверхности деталей вращения; обработка несбалансированных деталей.

Фрезерование поверхностей тел вращения способно обеспечить скорость съема материала большую, чем при точении, а достижимое качество обработки мо-

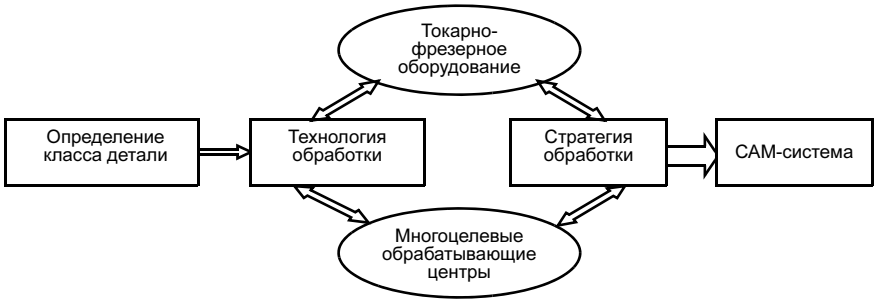


Рис. 1. Схема подготовки производства

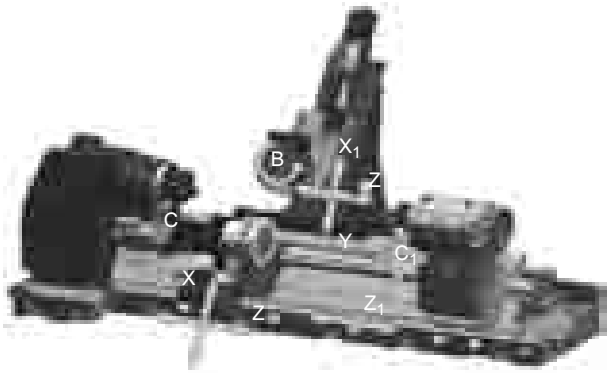


Рис. 2. Компоновка токарно-фрезерного центра

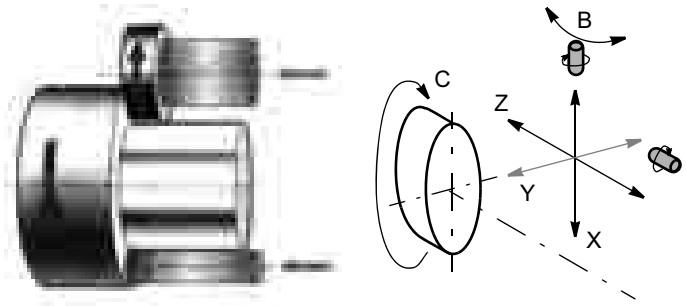


Рис. 3. Перемещения по осям станка

жет быть выше. Этот метод предназначен для обработки сложных деталей, когда требуются как операции точения, так и операции фрезерования. Основным результатом обработки на оборудовании данного типа являются сложные поверхности, профиль которых можно получить только при синхронизации поворота заготовки и перемещения инструмента. Кроме того, в таких деталях обычно требуется обработка большого количества отверстий на поверхности тела вращения. К этому классу деталей относятся детали со смещенным центром типа эксцентрик (коленвал, распредвал), несбалансированные детали, которые нельзя быстро вращать, нежесткие детали вращения типа шпиндель или ходовой винт. Это связано с тем, что применение фрезерования взамен точения всегда обеспечивает стружколомание. При этом силы резания ниже, что снижает усилия резания, следствием чего является стабильность процесса.

Фрезерование криволинейной поверхности заготовки происходит при перемещении по четырем осям станка. Обязательно необходима синхронизация работы станка по всем осям.

Токарно-фрезерный центр (Multi Task Centre) является результатом интегрирования фрезерного и токарного станков. Основная особенность такого центра заключается в возможности использования стационарного и вращающегося инструментов в одном исполнительном органе. Основные операции, для которых предназначен такой станок, — точение, фрезерование, сверление и нарезание резьбы. Но также возможны дополнительные операции: измерение, нарезание зубьев, шлифование, фрезерование тел вращения и др.

Станки этой группы предназначены для обработки сложных деталей, технология обработки которых требует большого количества переходов при единичном и мелкосерийном типах производств. Обработка рекомендуется от легкой черновой до чистовой за один, максимум два установа.

Многоцелевые обрабатывающие центры можно разделить на две группы: на базе токарного станка и на базе фрезерного станка.

На рис. 2 приведена одна из возможных компоновок современного многоцелевого обрабатывающего центра, его характеризует наличие следующих управляемых осей: *X* — перемещение инструмента перпендикулярно оси заготовки; *Y* — перемещение фрезерного шпинделя параллельно оси заготовки; *Z* — перемещение инструмента параллельно оси шпинделя; *C* (*C1*) — вращение шпинделя (контршпинделя); *Z*1 — перемещение контршпинделя; *B* — поворот фрезерного шпинделя.

Применяют два метода токарно-фрезерной обработки: периферийный (ось инструмента параллельна оси заготовки) и торцевой (ось инструмента перпендикулярна оси заготовки).

При расположении оси фрезы вдоль оси заготовки перемещения осуществляются по двум и более осям станка при одновременном вращении заготовки, а также инструмента. Требуемый профиль обрабатываемой заготовки обеспечивается за счет синхронизации поворота заготовки в токарном шпинделе станка, перемещения фрезерного шпинделя по оси *X* и поворота по оси *B* (рис. 3). Такой метод расположения инструмента применяется с использованием концевых фрез для получения профиля на торце заготовки или обработки осевых отверстий.

При расположении фрезы перпендикулярно оси вращения заготовки перемещение осуществляется по трем и более осям станка: смещение по оси *Y*, перемещение по осям *Z* и *X*, вращение заготовки и инструмента (см. рис. 3).

Имеются рекомендации по набору исходных данных при проектировании режимов обработки для расчета режимов резания.

Наибольшая производительность достигается при смещении инструмента E_w по оси *Y* относительно оси вращения шпинделя на расстояние, равное радиусу фрезы $D_c/2$. В противном случае получается эффект бочкообразования (рис. 4, *а*).

При фрезеровании заготовки со смещением фрезы на величи-

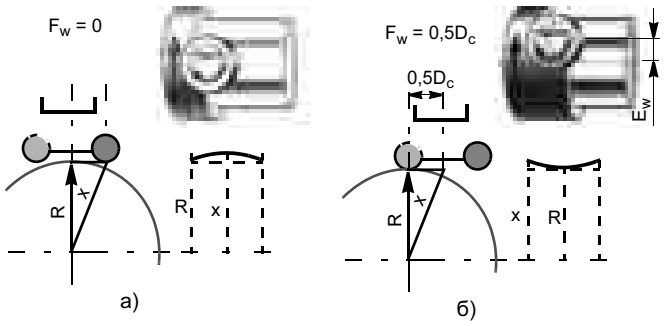


Рис. 4. Расположение фрезы по центру заготовки (*а*) и со смещением (*б*) ($x = \sqrt{R + (0{,}5D)^2}$)

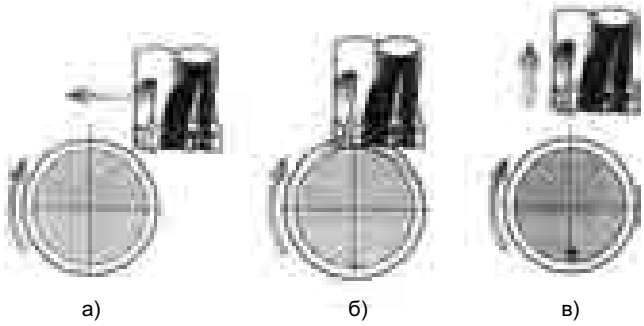


Рис. 5. Направление врезания и выхода инструмента: *б* — обработка

ну E_w (рис. 4, *б*) получается эффект лункообразования; этот способ расположения фрезы более предпочтителен, так как оказывает меньшее влияние на дальнейшую чистовую обработку.

Фреза врезается в заготовку (рис. 5, *а*), перемещаясь в тангенциальном направлении. Окружная скорость рабочей подачи заготовки выбирается в соответствии с рекомендуемой подачей на зуб для фрезы. Отвод производится в осевом направлении фрезы (рис. 5, *в*).

Черновая обработка

При черновой обработке применяют обычные торцовые фрезы. Скорость резания при фрезеровании тел вращения определяется частотой вращения фрезы, а подача — вращением заготовки и линейным перемещением инструмента (линейное перемещение фрезы вдоль оси заготовки a_e, мм/мин) (рис. 6).

Чистовая обработка

Для обеспечения качества и точности на чистовых операциях необходимо использовать фрезы с так называемыми зачистными пластинами. Торцовая кромка на этих пластинах прямая и длинная в отличие от обычных пластин с короткой и изогнутой торцовой кромкой. Поскольку именно торцовая кромка пластины формирует обрабатываемую цилиндрическую поверхность, то увеличение ее длины обеспечит повышение производительности. При чистовом фрезеровании глубина резания должна быть небольшой, так как при этом обеспечивается минимальный отжим инструмента.

Рассмотрим чистовую обработку на примере фрезы серии R390 производства фирмы Sandvik Coromant (Швеция). Для такого типа фрез при операциях фрезерования необходимо использовать зачистные пластины "Wiper".

Зачистная пластина "Wiper" фирмы Sandvik Coromant выступает в осевом направлении относительно остальных режущих пластин на фрезе на 0,05 мм (рис. 7). Одна зачистная пластина "Wiper" служит для создания плоского кольцевого пояска контакта фрезы с обрабатываемой поверхностью. Подача за оборот фрезы не должна превышать 60 % длины зачистной пластины.

Для получения теоретически точной геометрии детали при торцевом фрезеровании поверхности вращения фрезу необходимо сместить относительно оси заготовки на величину E_w (рис. 8), которую рассчитывают по формуле

$$E_w = \frac{D_{obs}}{2} - b_c, \text{ мм},$$

где D_{obs} — наружный диаметр зачистной фаски; b_s — длина режущей кромки зачистной пластины "Wiper".

Расчетные размеры фрезы приведены на рис. 9.

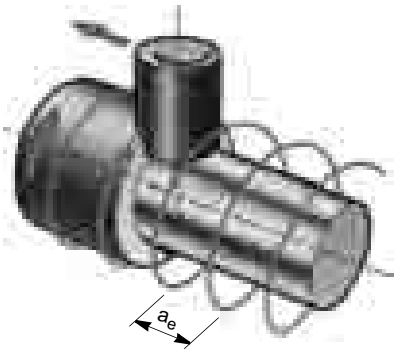


Рис. 6. Линейное перемещение фрезы

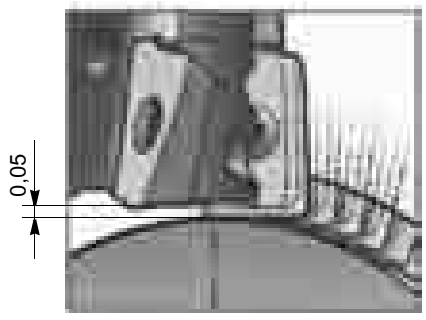


Рис. 7. Работа зачистной пластины

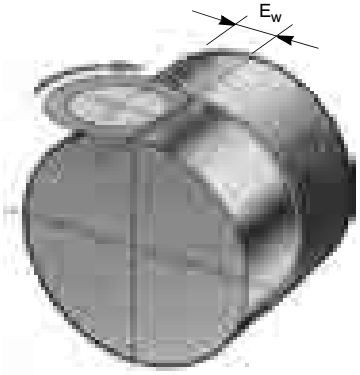


Рис. 8. Смещение фрезы

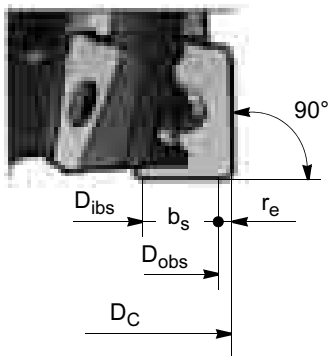


Рис. 9. Расчетные размеры фрезы (D_{ibs} — внутренний диаметр зачистной фаски, r_e — радиус зачистной пластины "Wiper")

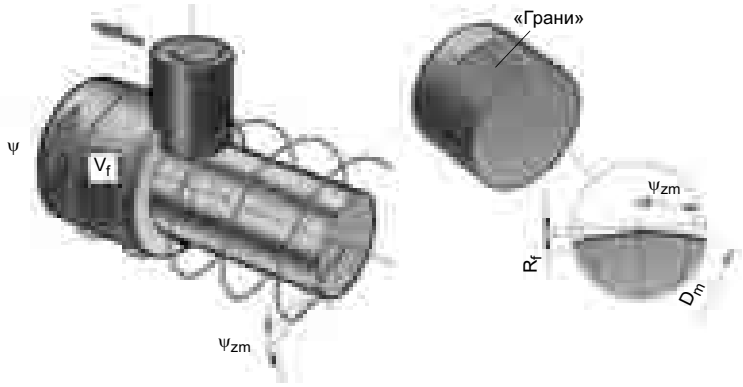


Рис. 11. Формирование грани неровности при чистовой обработке (ψ_{zm} — угол поворота заготовки на один поворот фрезы, ψ — угловая скорость, R_f — высота грани, D_m — теоретический диаметр, V_f — рабочая подача)

При обработке чистовыми фрезами и зачистными пластинами образуются стружки двух форм. Стандартная пластина срезает стружку в форме серпа, а зачистная пластина — в форме серпа с донышком (рис. 10). Стружка в форме донышка образуется в результате того, что режущая кромка зачистной пластины выступает в осевом направлении относительно других режущих пластин на 0,05 мм. Следовательно, только зачистная пластина формирует поверхность обрабатываемой детали.

При обработке поверхности тела вращения фрезерованием получаемая поверхность обработанной окружности будет иметь форму многогранника (рис. 11). Каждая "грань" образуется одним поворотом фрезы с одной зачистной пластиной. При увеличении количества зачистных пластин ширина грани уменьшается, но чистота поверхности будет зависеть от биения фрезы.

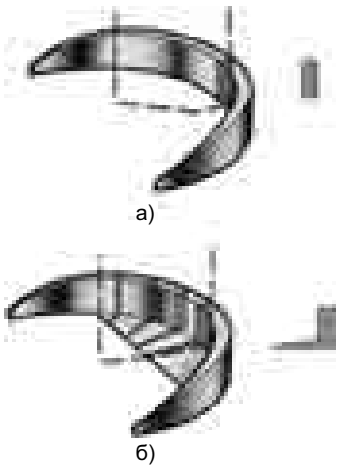


Рис. 10. Форма стружки при чистовой обработке стандартной пластиной (*а*) и зачистной пластиной "Wiper" (*б*) (штриховой линией обозначено положение инструмента)

Обработка поверхности шириной, равной диаметру фрезы

Для обработки поверхности, ширина которой равна диаметру фрезы, требуется как минимум два прохода. На первом проходе фреза смещается на величину E_{w1} (рис. 12, *а*) и за один оборот заготовки обрабатывает среднюю часть шейки, после чего перемещается на величину E_{w2} (рис. 12, *б*) и обрабатывает края на следующем обороте.

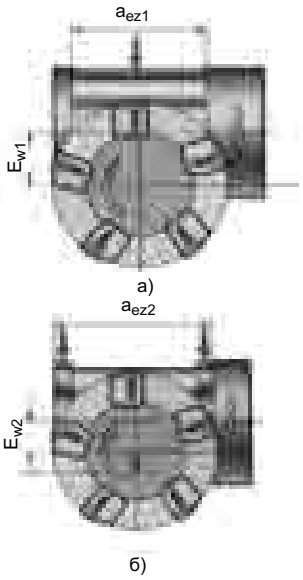


Рис. 12. Величина смещения фрезы и ширина фрезерования

Если обрабатываемая поверхность шире фрезы, на следующих оборотах фреза смещается в осевом направлении, оставаясь в позиции *а*. Величина осевого смещения не должна превышать 80 % от a_{ez1}.

При обработке вертикальных уступов концевыми фрезами со сменными пластинами на величину отклонения обработанной поверхности от перпендикулярности влияет как точность режущих пластин, так и отжим инструмента. Такой способ обработки требуется для обработки шеек валов, деталей эксцентриков. При этом обработка фрезерованием является наиболее предпочтительной.

ВЫВОДЫ

1. Создание и использование многоцелевых обрабатывающих центров является передовой тенденцией в металлообработке и требует развития инструментального и информационного обеспечения проектирования и расчета технологических процессов.

2. Повышение эффективности обработки может быть достигнуто путем использования новых технологий, в том числе при применении фрезерования для обработки тел вращения.

С. И. ПЕТРУШИН, д-р техн. наук, А. А. БАКАНОВ, инж., А. В. МАХОВ, студент
Томский политехнический университет

Геометрический и силовой анализ сборных сверл со сменными многогранными пластинами

Россия занимает лидирующие позиции в мире по протяженности железных дорог, в связи с чем остро стоит проблема повышения срока службы рельсов. МПС приняло решение о применении объемно-закаленных рельсов. Однако если средняя твердость материала ранее применявшихся рельсов составляла 280 НВ, то у объемно-закаленных — 38 $HRC_э$. Это привело к невозможности применения сверл из быстрорежущей стали и переходу на сборные сверла с механическим креплением твердосплавных сменных многогранных пластин (СМП). Конструкция сверла и схема крепления режущих пластин приведены на рис. 1 и 2. Первые результаты применения этого инструмента показали его низкую работоспособность, так как сверление производится в полевых условиях переносными рельсосверлильными машинками РСТ-1, РСТ-2, 3023, 3028 с низкой жесткостью технологической системы. Поэтому совершенствование конструкции этих инструментов имеет актуальное значение для практики.

При анализе конструкции этих инструментов необходимо учитывать их специфическое свойство, заключающееся в том, что получаемые геометрические параметры для каждой точки режущей кромки определяются способом ориентации СМП заданной формы в корпусе. Дополнительная трудность анализа геометрии связана с тем, что чем ближе рассматриваемая точка режущей кромки к оси инструмента, тем больше изменится положение статической основной плоскости P_{vc} и, соответственно, статической плоскости резания P_{nc} [1]. Для определения статических геометрических параметров (φ_c, λ_c, α_c, γ_c) в произвольной точке лезвия данного концевого инструмента по известной форме СМП с учетом ее ориентации в корпусе (рис. 3) воспользуемся следующими формулами [3]:

$$\sin\gamma_y^O = \frac{c}{r_и};$$

$$\sin\gamma_y^A = \frac{r_и}{r_A}\sin\gamma_y^O;$$

$$\operatorname{tg}\varphi_c^A = -\frac{\sin\gamma_x\sin\gamma_y^A + \operatorname{tg}\varphi_и^A\cos\gamma_y^A}{\cos\gamma_x}; \qquad (1)$$

$$\sin\lambda_c^A = \sin\varphi_и^A\sin\gamma_y^A - \cos\varphi_и^A\sin\gamma_x\cos\gamma_y^A;$$

$$\sin\gamma_c^A = \cos\varphi_и^A\sin\gamma_y^A + \sin\varphi_и^A\sin\gamma_x\cos\gamma_y^A;$$

$$\cos\alpha_c^A = \cos\alpha_п^A\cos\gamma_x\cos\gamma_y^A -$$
$$-\sin\alpha_п^A(\cos\varphi_и^A\sin\gamma_y^A + \sin\varphi_и^A\sin\gamma_x\cos\gamma_y^A).$$

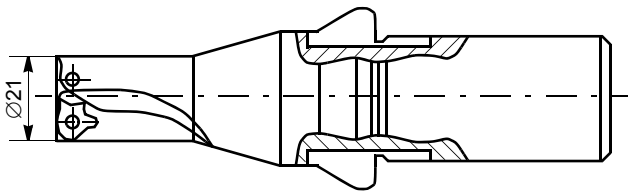


Рис. 1. Конструкция сверла с СМП

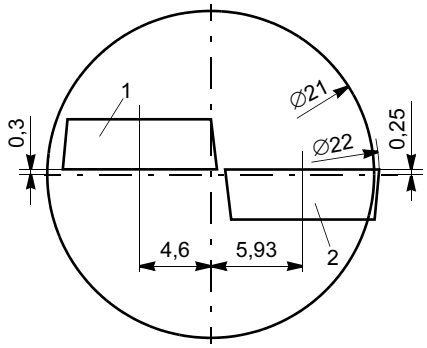


Рис. 2. Схема крепления СМП: *1*, *2* — центральная и периферийная пластины соответственно

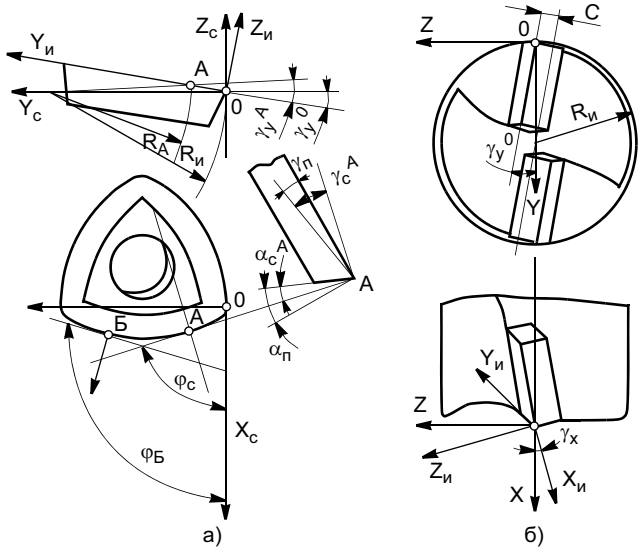
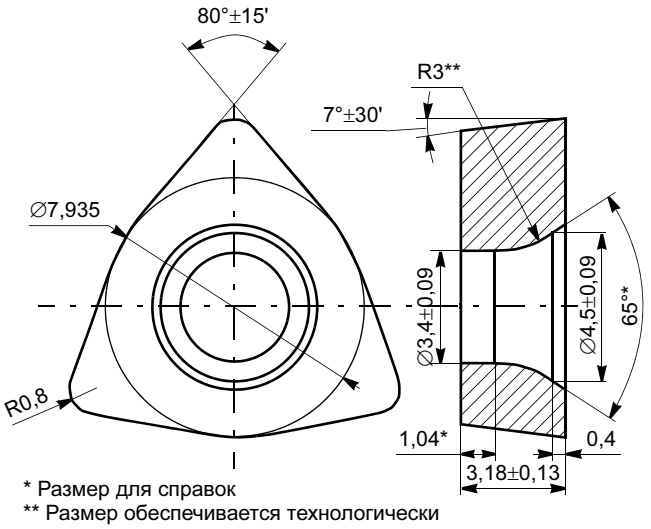


Рис. 3. Схема для определения геометрических параметров сверла с СМП: *а* — в произвольной точке; *б* — углы ориентации СМП в корпусе



* Размер для справок
** Размер обеспечивается технологически

Рис. 4. Размеры и форма пластин

Здесь c — расстояние от вершины СМП до диаметральной плоскости; $r_и$ — радиус инструмента; r_A — величина радиуса произвольной точки A; γ_y^O — фронтальный угол ориентации СМП на вершине O, в которой скорость резания максимальная; γ_y^A — фронтальный угол ориентации СМП в произвольной точке A; φ_c^A — статический угол в плане для точки A режущей кромки; λ_c^A — статический угол наклона режущей кромки в точке A; γ_c^A, α_c^A — статический передний и задний углы в точке A соответственно; $\alpha_п^A$ — задний угол пластины.

По формулам (1) были рассчитаны статические геометрические параметры сверла с СМП с диаметром сверления 22 мм (см. рис. 2). Геометрия пластин: $\alpha_{пл} = 7°$, $\gamma_{пл} = 0$. Размеры и форма пластин приведены на рис. 4, результаты расчета углов α_c (*1*), γ_c (*2*) и λ_c (*3*) в зависимости от радиуса r_A для периферийной (*а*) и центральной (*б*) пластин — на рис. 5. Установлено, что в области, близкой к оси сверла, происходит резкое колебание этих углов, ухудшающее заданные условия резания.

Наряду со статическими геометрическими параметрами необходимо также учитывать кинематику процесса резания, а именно — влияние вектора скорости подачи на направление результирующего вектора скорости резания. Кинематическую основную плоскость P_{vk} проводят через рассматриваемую точку перпендикулярно направлению скорости результирующего движения резания V_e. Это равносильно повороту станочной системы координат XYZ вокруг оси OY на угол $\psi = \text{arctg}(V_s/V)$ против часовой стрелки [1]. Исходя из обозначений геометрических параметров, приведенных на рис. 3, угол ψ равен γ_x.

Для применяемых на практике условий сверления (скорость резания n = 360 об/мин, скорость подачи $S_м$ = 32 об/мин) расчет показал, что кинематическая составляющая незначительно влияет на реальную геометрию сверла (в точке, наиболее близкой к центру сверла, $\psi \approx 5°$). Однако для других соотношений скорости резания и подачи кинематическая составляющая может оказывать значительное влияние и ее необходимо также учитывать для проведения более точных расчетов.

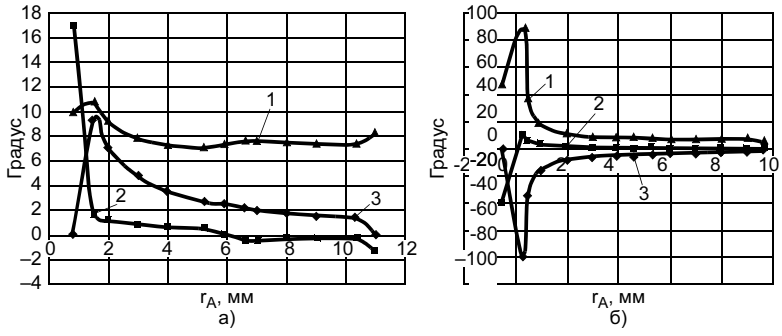


Рис. 5. Зависимость геометрических параметров от радиуса r_A

Для анализа причин выхода из строя инструмента необходимо определить силовые нагрузки, воспринимаемые им в процессе обработки, — величину и направление составляющих силы сверления.

С этой целью разработана методика определения силы резания при сверлении сверлами с СМП, основанная на удельной нагрузке, приходящейся на 1 мм длины режущей кромки [3].

Для этого режущую кромку разбивают на участки равной длины и для каждого участка с учетом рассчитанной выше геометрии определяют направление действия удельных составляющих силы резания P_{yi} и P_{zi} (рис. 6).

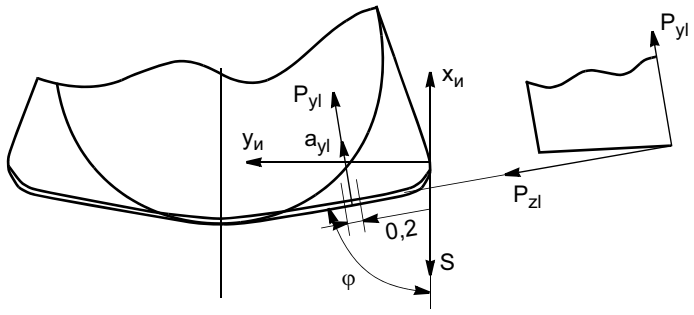


Рис. 6. Схема разбиения режущей кромки пластины для определения элементарных составляющих силы резания

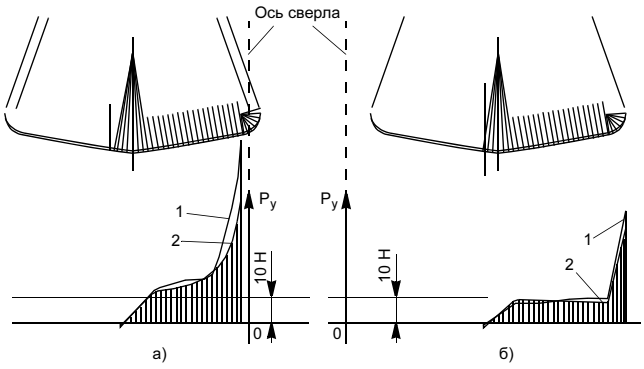


Рис. 7. Эпюры распределения радиальной составляющей силы резания P_y на лезвиях СМП для центральной (*а*) и периферийной (*б*) пластин: *1* — эксперимент; *2* — расчет

Суммарные составляющие силы резания на всей длине режущей кромки

$$P_z = \sum_{i=1}^{n} P_{yi}\cos\varphi_{Ui}\sin\gamma_{yi} - P_{zi}\cos\gamma_{yi};$$

$$P_y = \sum_{i=1}^{n} P_{yi}\cos\varphi_{Ui}\cos\gamma_{yi} + P_{zi}\sin\gamma_{yi}, \qquad (2)$$

где P_{yi}, P_{zi} — соответственно радиальная и тангенциальная составляющие силы резания в инструментальных координатах, приходящейся на 1 мм режущей кромки.

Если принять P_{yi} и P_{zi} равными const, можно воспользоваться известными экспериментальными данными об удельной касательной силе резания ΔP_z, приходящейся на 1 мм режущей кромки [2]:

$$P_z = \Delta P_z \sum_{i=1}^{n} k\cos\varphi_{Ui}\sin\gamma_{yi} - \cos\gamma_{yi};$$

$$P_y = \Delta P_z \sum_{i=1}^{n} k\cos\varphi_{Ui}\cos\gamma_{yi} + \sin\gamma_{yi}, \qquad (3)$$

где $k = P_{yi}/P_{zi}$.

Для подтверждения правильности этих предположений экспериментально определяли составляющие силы резания при точении стали 40Х твердостью 39 $HRC_э$ резцами с СМП, геометрия которых охватывала диапазон, полученный в результате расчетов геометрических параметров сверла, а материал режущих пластин аналогичен материалу пластин сверла. Эксперимент проводили на токарном станке 16К20Ф3 высокой точности с гидростатическими опорами шпинделя, составляющие силы резания измеряли при помощи трехкомпонентного токарного динамометра. Результаты сравнения полученных экспериментальных данных с теоретическими (P_{zi} = 364 Н/мм, k = 0,5), взятыми из работы [2] для составляющей силы резания P_y, приведены на рис. 7. В среднем различие между теоретическим расчетом и полученными экспериментальными данными составило для периферийной пластины 8 %, для центральной — 15 %, а характер распределения оказался аналогичным. В связи с этим можно сделать вывод о правильности предположений, заложенных в методику, и рекомендовать для оценочного расчета использовать данные работы [2].

На рис. 8, 9 приведены зависимости радиальной P_y, тангенциальной P_z составляющих силы резания в процессе врезания сверла, крутящего момента $M_{кр}$ и эксцентриситета e, возникающего из-за несовпадения оси действия момента пары сил от составляющих P_z на каждой пластине с осью сверла. Их анализ показал, что основной причиной выхода сверла из строя является потеря работоспо-

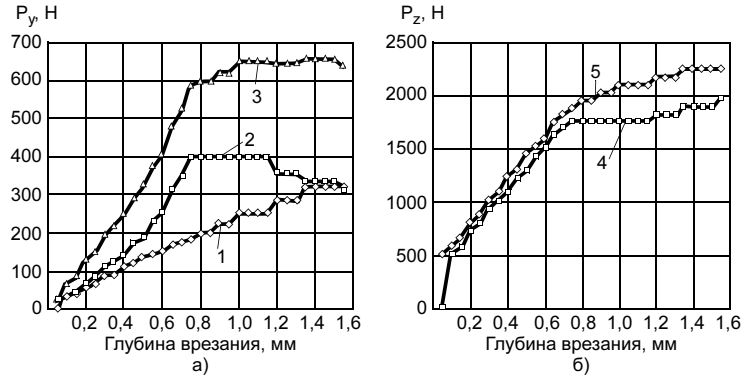


Рис. 8. Зависимость P_y (*а*) и P_z (*б*) от глубины врезания: *1—3* — периферийная, центральная и суммарная составляющие P_y соответственно; *4*, *5* — периферийная и центральная составляющие P_z соответственно

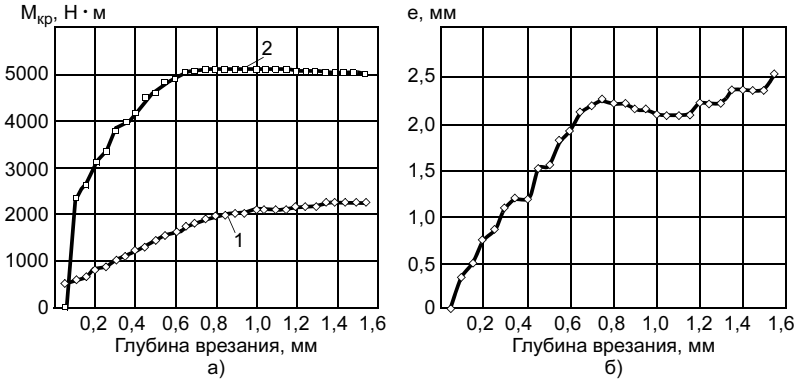


Рис. 9. Зависимость $M_{кр}$ (*а*) и e (*б*) от глубины врезания: *1*, *2* — периферийная и центральная составляющие $M_{кр}$ соответственно

собности СМП из-за дисбаланса сил, возникающего при сложении радиальной P_y и тангенциальной P_z составляющих силы резания от каждой пластины. Спецификой данного инструмента является не взаимная компенсация, а сложение составляющих P_y от каждой из пластин. При этом сверло постоянно работает при наличии радиальной силы, что отрицательно сказывается на его работоспособности и точности обработки при нежесткой технологической системе.

На основе приведенных данных разработаны рекомендации по улучшению конструкции режущей части сверл с СМП со сниженным дисбалансом P_y и $M_{кр}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Петрушин С. И.* Основы формообразования резанием лезвийными инструментами: Учебное пособие. Томск: Издательство НТЛ, 2004. 204 с.
2. *Протяжки* для обработки отверстий / Д. К. Маргулис, М. М. Тверской, В. Н. Ашихмин и др. М.: Машиностроение, 1986. 232 с.
3. *Баканов А. А., Петрушин С. И.* Работоспособность сверл с СМП при сверлении железнодорожных рельсов // Современные проблемы машиностроения. Томск. Изд-во ТПУ, 2006. С. 186—189.

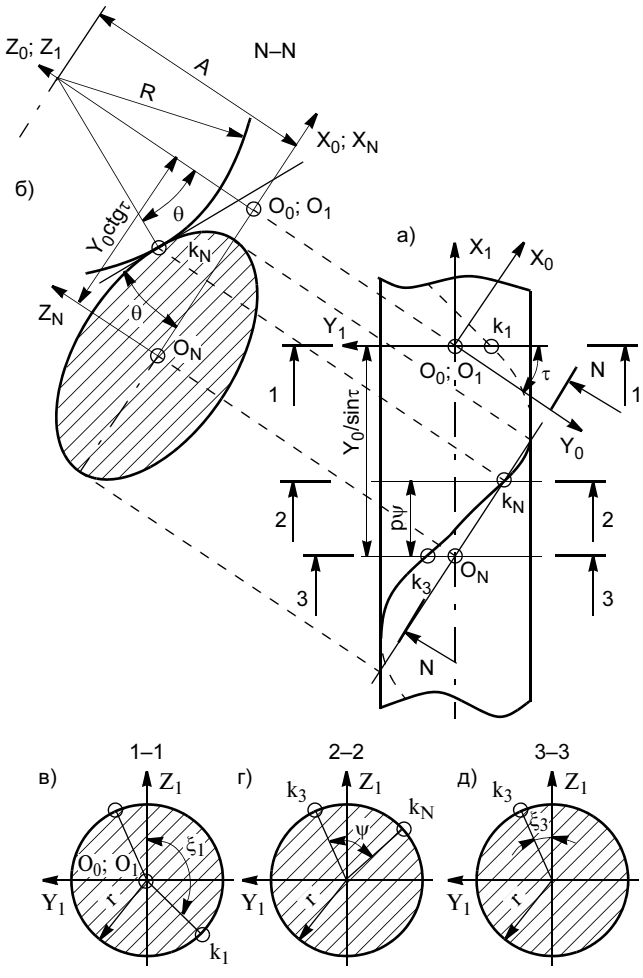
В. Г. ШАЛАМОВ, д-р техн. наук, С. Д. СМЕТАНИН, инж.
Южно-Уральский государственный университет

Совершенствование профилирования дискового инструмента при формообразовании винтовых поверхностей

Значительную часть среди машиностроительной продукции, в том числе металлорежущих инструментов, занимают изделия, имеющие винтовые поверхности (ВП). Обработка дисковым инструментом является наиболее распространенным способом получения ВП. В этом случае формообразование осуществляется методом обката, а значит, профиль ВП ни в одном сечении не совпадает с профилем дискового инструмента. Существуют различные методы определения профиля дискового инструмента. Они различаются как по принципу определения профиля (методы совмещенных сечений, огибающих, касательных и нормалей), так и применяемому математическому аппарату (графический, графоаналитический и аналитический). Однако графические и графоаналитические методы имеют более низкую степень точности расчетов, а аналитические обладают недостаточной наглядностью, что может привести к ошибкам. Кроме того, некоторые из существующих методов трудоемки и недостаточно формализованы. Следовательно, развитие методов профилирования является актуальной задачей.

Как известно [1], инструмент имеет формообразующие и неформообразующие участки. У дискового инструмента формообразующими участками являются точки профиля, лежащие на наружной поверхности, т. е. вдоль оси дискового инструмента в любом его сечении формообразование осуществляется элементарной окружностью определенного радиуса. Если рассмотреть достаточное число таких окружностей, то можно определить координаты точек контакта инструмента с ВП по всему профилю. На этом основана методика профилирующих окружностей [2]. Однако в ней существует допущение: рассматривается вектор нормали к ВП в плоскости, а не в пространстве.

Используем ключевое положение метода: процесс формообразования ВП осуществляется совокупностью элементарных окружностей, расположенных на определенном расстоянии относительно точки скрещивания осей. Расчетная схема момента профилирования произвольной точки *k* профиля ВП приведена на рисунке. Систему координат (СК) $X_1Y_1Z_1$ свяжем с ВП, направив ось X_1 по оси ВП. С инструментом свяжем СК X_0, Y_0, Z_0: ось Y_0 расположена параллельно оси инструмента и плоскости X_1Y_1 ВП. Начала систем координат совпадают и лежат на оси ВП, ось Z_0 совпадает с осью Z_1. Для решения задачи считаем известными параметры установки (межосевое расстояние A и угол τ разворота оси дискового инструмента), параметры детали (наружный диаметр D, угол ω наклона винтовой линии на нем и координаты Y_1, Z_1 точек профиля ВП в радиальном сечении *1—1* (см. рисунок, поз. *в*). Процесс формообразования на виде в плане рассмотрим в двух радиальных сечениях ВП: *1—1* и *2—2* (см. рисунок, поз. *г*). Сечение *1—1* яв-



Расчетная схема формообразования точки профиля винтовой поверхности профилирующей окружностью

ляется начальным: оно проходит через точку скрещивания осей, в нем же известны координаты точек профиля ВП. Сечение *2—2* определяется моментом контакта рассматриваемой точки k_N.

Рассмотрим сечение наладки инструмент—ВП в момент профилирования плоскостью *N—N*, перпендикулярной оси дискового инструмента (см. рисунок, поз. *б*). В сечении *N—N* проекция точки k_N находится на винтовой линии цилиндрической поверхности радиуса *r*. Эту точку формирует профилирующая окружность радиуса *R*. Условие контакта $\bar{N}\,\bar{V} = 0$ в этом сечении вырождается в условие наличия общей касательной к профилирующей окружности и эллипсу, на котором располагается профилируемая точка ВП (здесь $\bar{N}$ — вектор нормали к профилю ВП, $\bar{V}$ — вектор скорости относительного движения инструмента и ВП). Для упрощения записи их уравнений введем промежуточную плоскую СК $X_N Z_N$, начало которой расположено в точке O_N пересечения плоскости *N—N* с осью X_1 ВП. В этом случае уравнения профилирующей окружности дискового инструмента и эллипса цилиндрической поверхности, на которой находится проекция k_N расчетной точки ВП, имеют вид

$$\begin{cases} (X_N - Y_0 \operatorname{ctg}\tau)^2 + (A - Z_N)^2 = R^2; & (1) \\ \dfrac{Z_N^2}{r^2} + \dfrac{X_N^2}{(r/\sin\tau)^2} = 1. & (2) \end{cases}$$

Запишем уравнения касательных к оси X_N через первые производные уравнений окружности и эллипса:

$$X'_N = \operatorname{tg}\theta = \frac{Y_0 \operatorname{ctg}\tau - X_N}{A - Z_N}; \quad X'_N = \operatorname{tg}\theta = \frac{X_N \sin^2\tau}{Z_N},$$

где θ — угол контакта.

С учетом условия наличия общей касательной можно записать

$$\frac{Y_0 \operatorname{ctg}\tau - X_N}{A - Z_N} = \frac{Z_N \sin^2\tau}{Y_N}.$$

Тогда боковое смещение профилирующей окружности

$$Y_0 = \frac{Z_N A \operatorname{tg}\tau \sin^2\tau}{Y_N} + Z_N \sin\tau \cos\tau. \qquad (3)$$

Здесь неизвестны координаты X_N, Z_N точки контакта. Для их определения рассмотрим радиальное сечение ВП *3—3* (см. рисунок, поз. *д*), проходящее через точку O_N. Тогда X_N можно определить, с одной стороны, из элементарного тригонометрического соотношения (см. рисунок, поз. *а*):

$$X_N = p\psi/\cos\tau, \qquad (4)$$

где *p* — винтовой параметр, равный $D/2\operatorname{tg}\omega$; ψ — угол, характеризующий взаимосвязь положений расчетной точки профиля ВП в сечениях *2—2* и *3—3*.

С другой стороны, координату X_N можно определить путем винтового проецирования точки *k* ВП из радиального сечения *3—3* в сечение *N—N*. Для этого используем полученную в работе [3] зависимость, связывающую координаты профиля в радиальном сечении ВП с координатами в сечении под некоторым углом к оси ВП:

$$X_N = \sin\tau(Y_3 \cos\psi + Z_3 \sin\psi) + p\psi \cos\tau, \qquad (5)$$

где Y_3, Z_3 — координаты расчетной точки ВП в сечении *3—3* (см. рисунок, поз. *д*), равные соответственно $r\cos\xi_3$ и $r\sin\xi_3$.

Номер точки профиля ВП	Координаты точек профиля ВП, мм		Угол ψ, градус	Профиль инструмента	
	Y_1	Z_1		Боковое смещение Y_0, мм	Радиус профилирующей окружности R, мм
1	–35,238	12,826	58,164	33,825	34,716
2	–33,089	10,973	54,925	32,867	37,320
3	–28,691	8,306	48,001	30,567	41,879
4	–26,556	9,033	44,014	28,471	42,525
5	–25,349	10,769	41,460	26,659	41,779
6	–25,288	12,618	40,927	25,790	40,269
7	–25,809	16,838	41,073	24,664	36,472
8	–25,177	21,934	39,407	22,660	32,358
9	–23,188	26,712	35,852	19,985	28,872
10	–19,785	30,717	30,293	16,549	26,277

Здесь ξ_3 — угловое положение расчетной точки профиля ВП относительно оси Z_1 в сечении *3—3*, которое на данном этапе расчета нам неизвестно. Оно может быть определено при рассмотрении сечений *1—1* и *3—3*. Радиальные сечения *1—1* и *3—3* взаимосвязаны: расстояние между сечениями на виде в плане пропорциональны углу поворота расчетной точки профиля ВП из сечения *1—1* в сечение *3—3*:

$$p\xi_3 = p\xi_1 + Y_0/\sin\tau.$$

Тогда искомое угловое положение ξ_3 можно определить как сумму начального углового положения ξ_1 относительно оси Z_1 и угла поворота из начального сечения *1—1* в сечение *3—3*:

$$\xi_3 = \xi_1 + Y_0/(p\sin\tau). \qquad (6)$$

Таким образом, имеем шесть уравнений (1) — (6) и восемь неизвестных ($\psi, X_N, Z_N, R, Y_0, \xi_3, Y_3, Z_3$). Дальнейший алгоритм решения заключается в последовательном исключении неизвестных с целью получения уравнения, содержащего одну неизвестную величину — угол ψ:

$$\psi = \frac{r\cos\tau}{p\sin\tau}\cos\left(\xi_1 + \frac{A\psi\,\mathrm{tg}^2\tau}{\left|\sqrt{r^2 - (p\psi\,\mathrm{tg}\tau)^2}\right|}\right). \qquad (7)$$

Начальное угловое положение ξ_1 рассчитывают по известным координатам Y_1, Z_1 расчетных точек профиля ВП в сечении *1—1* (см. рисунок, поз. *в*). Решая трансцендентное уравнение (7), находим угол ψ, затем определяем требуемый профиль (через параметры Y_0, R) дискового инструмента. Таким образом, прямая задача решена. В качестве примера определим профиль дискового инструмента для обработки ВП канавки цилиндрической фрезы, профиль которой задан следующими параметрами: наружный диаметр D =75 мм, глубина канавки h = 10 мм, радиус дна ρ = 3,5 мм, передний угол в нормальном сечении γ_N = 18°, задний угол α = 20°, величина ленточки f = 0,5 мм, число зубьев n = 8. По этим данным отыскиваются координаты Y_1, Z_1 точек профиля ВП. Кроме того, известны угол наклона винтовой линии на наружном диаметре ω = 35°, межосевое расстояние A = 60 мм и угол разворота оси дискового инструмента τ = 25°. Результаты расчета приведены в таблице.

В отличие от большинства аналитических методик метод профилирующих окружностей нагляден, так как используются геометрические зависимости, легко поддающиеся проверке, что уменьшает вероятность получения ошибочного результата. Кроме того, он компактен и хорошо формализован, что необходимо для составления блок-схемы и написания программы расчета. При решении по данному методу не требуется определять тангенс угла контакта, который может быть равен или близок 90° и, следовательно, либо не будет иметь действительного решения, либо полученная величина осложнит дальнейший расчет. Поэтому метод обеспечивает решение для любого профиля ВП.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лашнев С. И., Юликов М. И.* Проектирование режущей части инструмента с применением ЭВМ. М.: Машиностроение, 1980. 208 с.
2. *Шаламов В. Г., Сметанин С. Д.* Прямая задача профилирования дискового инструмента // Известия Челябинского научного центра УрО РАН, 2005. Вып. 3. С. 16—21.
3. *Сметанин С. Д., Шаламов В. Г.* Взаимосвязь координат расчетных точек профиля винтовой поверхности в различных секущих плоскостях // Прогрессивные технологии в машиностроении. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. С. 56—64.

Г. С. ЖЕЛЕЗНОВ, канд. техн. наук, С. Г. ЖЕЛЕЗНОВА, инж., М. А. ШЕВЛЯКОВ, инж.
Филиал Самарского государственного технического университета (Сызрань)

Оптимизация допусков на размеры гладких цилиндрических соединений

Система допусков и посадок для гладких цилиндрических соединений размером 1—500 мм (ГОСТ 25346—89) имеет недостатки, обусловленные делением вышеуказанного диапазона размеров на тринадцать интервалов. Допуски в каждом интервале определены по среднему геометрическому размеру интервала

$$T_N = \alpha_N(0{,}45\sqrt[3]{d_{ci}} + 0{,}001 d_{ci}),$$

где α_N — коэффициент точности для квалитета с номером N; d_{ci} — средний геометрический размер для i-го интервала, определяемый его начальным d_{1i} и конечным d_{2i} размерами и равный $\sqrt{d_{1i}d_{2i}}$.

По средним геометрическим размерам определены также и основные отклонения в каждом интервале. Определенно установлено, что оптимальные значения допуска и основного отклонения определяются конкретным номинальным размером. Усреднение допусков и отклонений, вычисление их через средние геометрические размеры обусловливают их отклонения от оптимальных значений тем значительнее, чем больше конкретный размер отличается от среднего геометрического. Отклонения допусков от оптимальных значений свидетельствуют об ухудшении нормированного уровня качества соединений тем в большей степени, чем больше конкретный размер отличается от среднего геометрического размера интервала. При этом отношение конечного размера к начальному в разных интервалах существенно отличается. Это определяет непостоянство относительных отклонений допусков и основных отклонений от оптимальных значений в разных интервалах. Например, для первого интервала 1—3 мм относительные отклонения допусков от оптимальных значений для начального и конечного размеров равны соответственно 21 и –16 %, а для последнего интервала 400—500 мм — соответственно 5 и –4 %. Это свидетельствует о том, что нормированный ГОСТ 25346—89 уровень качества соединений неодинаков для разных интервалов и уменьшается с уменьшением номинальных размеров соединений. Расчеты [1] показывают, что одинаковые относительные отклонения допусков от их оптимальных значений можно обеспечить одинаковым соотношением конечных и начальных размеров во всех интервалах.

Деление диапазона размеров от 1 до 500 мм на интервалы определяет и то, что близкие к граничным значениям интервалов почти одинаковые, но находящиеся в соседних интервалах размеры имеют существенно разные допуски. Например, в седьмом квалитете нормированный допуск для размера 3 мм равен 8 мкм, а для размера 3,1 мм — 11 мкм, т. е. относительная разность допусков для этих размеров (11 – 8)/8 = 0,375, т. е. 37,5 %. Допуски по седьмому квалитету на размеры 400 и 400,5 мм, близкие к граничному размеру двух последних интервалов, составляют соответственно 57 и 63 мкм. Относительная разность их равна (63 – 57)/57 = 0,105, т. е. 10,5 %. Это свидетельствует о том, что весьма близкие размеры, расположенные в соседних интервалах, при одинаковом квалитете существенно отличаются по точности и тем значительнее, чем меньше размеры.

Таблица 1

Номер по порядку	Интервал размеров, мм		$d_к - d_н$, мм	$d_к/d_н$
	$d_н$	$d_к$		
1	>1	⩽3	2	3
2	>3	⩽6	3	2
3	>6	⩽10	4	1,67
4	>10	⩽18	8	1,8
5	>18	⩽30	12	1,67
6	>30	⩽50	20	1,67
7	>50	⩽80	30	1,6
8	>80	⩽120	40	1,5
9	>120	⩽180	60	1,5
10	>180	⩽250	70	1,39
11	>250	⩽315	65	1,26
12	>315	⩽400	85	1,143
13	>400	⩽500	100	1,25

Существенным недостатком данной системы допусков и посадок является и то, что интервалы размеров установлены неявно: разности начального и конечного размеров каждого интервала, их соотношения с изменением размеров изменяются немонотонно, не проявляя каких-либо закономерностей (табл. 1).

Целесообразно установить интервалы размеров такими, чтобы соблюдалось постоянное отношение конечного размера интервала к начальному в каждом интервале[1]. Это определило бы одинаковые относительные отклонения допусков от оптимальных значений во всех интервалах.

Указанные недостатки системы допусков и посадок обусловлены необходимостью представления информации о допусках и отклонениях в форме таблиц, так как в период разработки этой системы не было более совершенных носителей информации.

[1] *Железнов Г. С.* Оптимизация допусков на линейные размеры гладких цилиндрических соединений // Вестник машиностроения. 2001. № 4. С. 80—81.

В настоящее время в связи с широким распространением компьютерной техники ограничения, связанные с необходимостью представления информации в ограниченном количестве таблиц, отсутствуют. При проектировании технических объектов машиностроения с применением компьютеров в качестве носителей информации стало возможным назначать оптимальные значения допусков и отклонений, определяемых конкретными номинальными размерами, что позволит улучшить систему допусков и качества данной продукции. При этом допуски целесообразно вычислять по зависимости

$$T_N = 10 \cdot 1{,}6^{N-6} \times$$

$$\times (0{,}45\sqrt[3]{d} + 0{,}001d), \text{ мкм},$$

где d — конкретный номинальный размер, мм.

Основные отклонения следует определять по известным зависимостям, содержащимся в ГОСТ 25346—89 и представленным в табл. 2, в которой размер d приведен в мм, а отклонения — в мкм. Приведенные зависимости целесообразно реализовать на компьютере в виде вычислительной программы. Для определения предельных отклонений в табл. 2 достаточно в программе задать номинальный размер d, номер квалитета N и букву основного отклонения. Это позволит не только улучшить допуски на размеры, но и уменьшить затраты времени на их определение.

При этом возникает возможность увеличения допусков: не ухудшая качества соединений, для размеров интервалов, меньших средних геометрических, применять табличные допуски и основные отклонения, а для размеров интервала, превышающих средние геометрические, допуски и основные отклонения определять по номинальным размерам.

Таблица 2

Номер по порядку	Отклонение для вала, мкм			Отклонение для отверстия, мкм		
	Основное e_0	Нижнее ei	Верхнее es	Основное E_0	Нижнее EI	Верхнее ES
1	$a = -(265 + 13d)$ при $d \leqslant 120$ $a = -3{,}5d$ при $d > 120$	$a - T_N$	a	$A = -a$	A	$A + T_N$
2	$b = -(140 + 0{,}85d)$ при $d \leqslant 160$ $b = -18d$ при d > 160	$b - T_N$	b	$B = -b$	B	$B + T_N$
3	$c = -52d^{0,2}$ при $d \leqslant 40$ $c = -(95 + 0{,}8d)$ при $d > 40$	$c - T_N$	$-c$	$C = -c$	C	$C + T_N$
4	$d = -16d^{0,44}$	$d - T_N$	d	$D = -d$	D	$D + T_N$
5	$e = -11d^{0,41}$	$e - T_N$	e	$E = -e$	E	$E + T_N$
6	$f = -5{,}5d^{0,41}$	$f - T_N$	f	$F = -f$	F	$F + T_N$
7	$g = -2{,}5d^{0,34}$	$g - T_N$	g	$G = -g$	G	$G + T_N$
8	$h = 0$	$-h$	0	H	0	$+T_N$
9	j	$-\frac{T_N}{2}$	$+\frac{T_N}{2}$	J	$-\frac{T_N}{2}$	$+\frac{T_N}{2}$
10	при $3 < N < 8$ $k = +0{,}6\sqrt[3]{d}$ при $4 > N > 7$ $k = 0$	k 0	$k + T_N$ $+ T_N$	$K = -k$ $K = 0$	$-T_N$	0
11	$m = T_7 - T_6$	m	$m + T_N$	$M = -m$	$M - T_N$	M
12	$n = +5d^{0,34}$	n	$n + T_N$	$N = -n$	$N - T_N$	N
13	$p = 3 + T_7$	p	$p + T_N$	$P = -p$	$P - T_N$	P
14	$r = \sqrt{ps}$	r	$r + T_N$	$R = -r$	$R - T_N$	R
15	$s = 3 + T_8$ при $d \leqslant 50$ $s = +(T_7 + 0{,}4d)$ при $d > 50$	s	$s + T_N$	$S = -s$	$S - T_N$	S
16	$t = T_7 + 0{,}63d$	$+t$	$t + T_N$	$T = -t$	$T - T_N$	T
17	$u = T_7 + d$	u	$u + T_N$	$U = -u$	$U - T_N$	U
18	$v = T_7 + 1{,}25d$	v	$v + T_N$	$V = -v$	$V - T_N$	V
19	$x = T_7 + 1{,}6d$	x	$x + T_N$	$X = -x$	$X - T_N$	X
20	$y = T_7 + 2d$	y	$y + T_N$	$Y = -y$	$Y - T_N$	Y
21	$z = T_7 + 2{,}5d$	z	$z + T_N$	$Z = -z$	$Z - T_N$	Z
22	$Za = T_8 + 3{,}15d$	Za	$Za + T_N$	$ZA = -Za$	$ZA - T_N$	ZA
23	$Zb = T_9 + 4d$	Zb	$Zb + T_N$	$ZB = -Zb$	$ZB - T_N$	ZB
24	$Zc = T_{10} + 5d$	Zc	$Zc + T_N$	$ZC = -Zc$	$ZC - T_N$	ZC

ВЫВОДЫ

1. Представляется возможным улучшить систему допусков, если допуски и основные отклонения вычислять не по среднему геометрическому размеру интервала размеров, к которому относится данный номинальный размер, а по номинальному значению размера.

2. Система допусков и посадок по ГОСТ 25346—89 не является совершенной в части установленных в ней интервалов размеров, не отвечающих каким-либо закономерностям.

3. Для обеспечения одинакового уровня нормированной точности размеров целесообразно определить интервалы размеров, руководствуясь постоянным отношением граничных размеров интервалов.

4. Не снижая качества соединений деталей машин, возможно расширить допуски на размеры, сохранив их значения в каждом интервале для размеров, не превышающих средних геометрических, для которых допуски следует вычислить по среднему геометрическому размеру, а для размеров интервала, превышающих средние геометрические допуски, — по номинальному значению.

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

Состояние и развитие процесса сварки трением линейных соединений

Ч. 2. Совершенствование инструмента и технологических схем сварки[1]

Конструкция инструмента и геометрия отдельных его элементов — рабочего стержня и опорного бурта — важнейшие конструктивно-технологические параметры процесса сварки трением с перемешиванием (СТП), наиболее заметно влияющие на формирование структуры шва и соединения в целом [1]. Как отмечалось в первой части обзора, в процессе сварки инструмент испытывает высокие нагрузки. Крутящий момент, вращающий инструмент, генерирует фрикционный нагрев материала, а усилия, прилагаемые к инструменту, обеспечивают продвижение его в массе материала в направлении сварки. Поверхности вращающегося рабочего стержня и опорного бурта инструмента, контактирующие с материалом кромок, образуют с ним пары трения, непосредственно участвуя в процессе фрикционного нагрева и образовании потоков пластического течения.

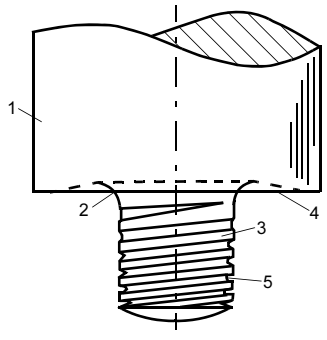


Рис. 1. Инструмент *1* для СТП с плавным сопряжением *2* поверхностей рабочего стержня *3* и опорного бурта *4* и по внутреннему диаметру витка *5*

Высокие циклические напряжения в инструменте при СТП (кручение со знакопеременным изгибом) обусловливают два основных направления его разработки:

— повышение эффективности термомеханического взаимодействия инструмента с материалом стыка;

— использование для инструмента более прочных и износостойких материалов.

При этом преследовались следующие практические цели: повышение ресурса инструмента; возможность увеличения толщины соединяемых деталей; расширение номенклатуры соединяемых СТП материалов (сплавов Ti, Cu, Mg, стали и др.); повышение производительности (скорости сварки); решение проблемы устранения кратера в конце шва и дефектов в нем; возможность сварки деталей различной формы с соединениями разных типов и др.

В 90-х годах было запатентовано много предложений, касающихся конструкции инструмента. В одном из ранних патентов Института сварки Великобритании (TWI) предлагался инструмент для сварки трением с перемешиванием[2] с многочисленными вариантами конфигурации рабочего стержня [2, 3]. Из заявленных вариантов можно выделить основные признаки: конусную форму стержня; разную форму его поперечного сечения; наличие на конусной поверхности стержня по меньшей мере одного среза, выступа, витка спиральной нарезки или каких-либо других фрагментов, интенсифицирующих процессы перемешивания и пластического течения материала. Длина стержня зависит от длины соединяемых кромок, а отношение его диаметра в зоне опорного бурта к длине составляет примерно от 4:1 — при толщине кромок 3—6 мм и до 1:1 — при толщине кромок 15—25 мм.

Существенное повышение эффективности инструмента было получено при выполнении на поверхности его рабочего стержня винтовой нарезки [4], а также при модификации опорного бурта инструмента[3] — выполнении на его куполообразной поверхности кольцевых или спиральных канавок и других элементов рельефа. Это позволило получить соединения с высокой плотностью шва при сварке алюминиевого сплава 6082 толщиной от 1,2 до 12,7 мм с хорошей воспроизводимостью качества.

В работе [5] акцентируется внимание на необходимости плавного сопряжения поверхностей всех элементов рельефа на рабочем стержне, что снижает опасность его разрушения при сварке. Особенно важно обеспечить плавное сопряжение в месте пересечения поверхностей рабочего стержня и опорного бурта. На рис. 1 приведен инструмент[4] для СТП высокопрочных алюминиевых сплавов с таким сопряжением поверхностей стержня и бурта, а также со спиральной нарезкой на стержне, у которой отношение внешнего

[1] Ч. 1 — см "Технология машиностроения", 2007, № 8, с. 34—39.

[2] Патент 2.306.366 (Великобритания).

[3] Международный патент 95/00005 (Великобритания).

[4] Патент 6.676.004 (США).

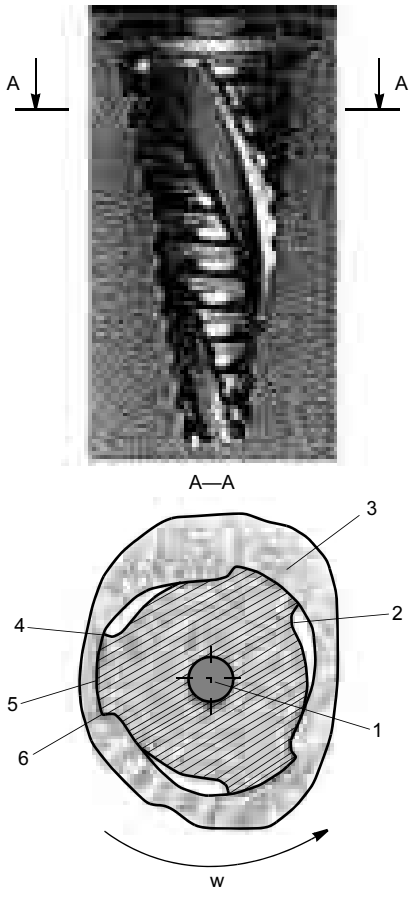


Рис. 2. Инструмент для СТП: *1* — рабочий стержень; *2* — спиральная полость; *3* — соединяемый материал; *4*, *6* — острые кромки винтовой нарезки; *5* — наружная поверхность витков винтовой нарезки

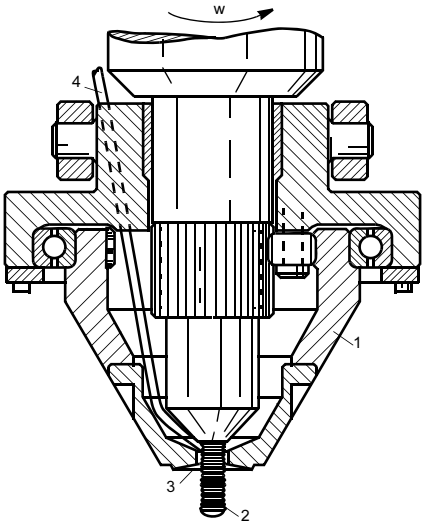


Рис. 3. Инструмент для СТП с регулируемым вылетом рабочего стержня *2* относительно опорного бурта *3* (с корпусом *1*), вращением их в разных направлениях (от одного привода) и подачей в зону сварки присадки (через тракт *4*)

диаметра витка к внутреннему возрастает, а шаг спирали уменьшается в направлении от бурта к концу стержня и плавно сопряжена поверхность витков с внутренним диаметром. Такой инструмент позволил соединить более толстые (до 25,4 мм) алюминиевые сплавы и увеличить скорость сварки [5].

Эффективный элемент рельефа поверхности стержня был предложен авторами изобретения[5], в котором рабочий стержень инструмента для сварки встык выполнен в виде усеченного конуса, поверхность которого имеет винтовую нарезку. Витки нарезки пересекаются под большим углом двумя-тремя спиральными проточками на всю длину стержня (рис. 2). Наличие таких проточек усиливает эффект "шнека" и дополнительно уменьшает долю объема рабочего стержня в объеме обработки материала вращающимся стержнем. Обе эти особенности конструкции способствуют более свободному интенсивному движению материала, разогретого до пластического состояния, фрагментизации и диспергированию частиц оксидов.

Важным этапом в совершенствовании инструмента стали разработки, связанные с решением проблемы устранения или предупреждения образования кратера в конце шва при выведении вращающегося рабочего стержня из стыка. На предприятии NASA в Huntsville (США) и ряде других предприятий была разработана конструкция инструмента с возможностью осевого перемещения стержня относительно корпуса с опорным буртом инструмента[6, 7]. Такой инструмент (рис. 3) позволял выполнять сварку, не меняя инструмент для каждой толщины детали, а устанавливая вылет рабочего стержня относительно опорного бурта, соответствующий толщине детали. Благодаря появившейся возможности автоматического регулирования вылета рабочего стержня стала возможной автоматическая сварка стыков деталей с переменным сечением соединяемых кромок. Кроме того, была решена проблема сварки без образования кратера в конце шва или его устранения. Разделение приводов рабочего стержня и корпуса с опорным буртом инструмента расширило его технологические возможности. Появились новые технологические схемы сварки и конструкции сварочных инструментов, а также сварочных головок с раздельным управлением скоростью и направлением вращения рабочего стержня и опорного бурта. Стало возможным введение присадочного металла в шов[5, 8] вблизи рабочего стержня (см. рис. 3).

В дальнейших разработках конструкции инструмента [5—7] сохраняется тенденция к интенсификации пластического течения и перемешивания материала, а также снижению уровня сопротивления материала при продвижении в нем инструмента.

В TWI были разработаны и испытаны инструменты серий Whorl^{TM} и Triflute^{TM} [5, 7] для соединения плит из алюминиевого сплава группы 6000 толщиной 25—40 мм при одностороннем подходе и до 75 мм — при двустороннем. Форма рельефа рабочего стержня этих инструментов (рис. 4) обеспечивает объем стержня, значительно меньший объема перерабатываемого им материала (рабочего пространства инструмента). Чем больше разница в объемах рабочего стержня и его рабочего пространства, тем, по мнению авторов работы [5], эффективней конструкция инструмента, поскольку при этом создаются условия для более свободного течения разогретого до пластического состояния материала. Отмечается также [7], что еще более интенсивное течение

[5] Патент 02/00908 (Швеция).
[6] Патент 5697544 (США).
[7] Патент 98/00861 (Швеция).
[8] Патент 0289603 (США).

металла вокруг инструмента достигается при расстоянии между витками винтовой нарезки на рабочем стержне, большем толщины витков, и если оно уменьшается от основания к концу стержня (рис. 4, *а*). В работе [8] трехмерным моделированием с привлечением динамики течения жидкости демонстрируются преимущества другого инструмента, типа MX Trivex™ (рис. 5), в сравнении с инструментом MX Triflute™. При сопоставимом значении прочности соединений (соответственно 480 и 470 МПа) инструмент Trivex™ более прочен и прост в изготовлении, поскольку форма его рабочего стержня проста — усеченная трех-, четырехгранная пирамида, не содержит резьбовой или какой-либо другой нарезки на поверхности. Однако эти результаты нуждаются в более серьезном экспериментальном исследовании.

В процессе сварки на лицевую поверхность шва может выдавливаться небольшое количество металла. Фирмой "Боинг" разработан[9] инструмент с радиально установленными на нем резцами, срезающими с лицевой поверхности лишний металл.

Заслуживает внимания предложение воздействовать на массу разогретого до пластического состояния материала вибрационными силами путем механического колебания сварочного инструмента[10] или пульсирующими силами посредством инструмента специальной формы[11]. В первом случае для введения вибрации в пластический материал шва (рис. 6) необходимы сложные исполнительные механизмы и повышенная прочность, особенно усталостная, инструмента. Во втором случае[11] вибрация создается за счет небольшого угла отклонения плоскости опорного бурта от плоскости, ортогональной оси вращения инструмента. Вибрация в движущейся массе пластического материала способствует измельчению структуры шва и уплотняет его.

Разнообразие видов сварных конструкций и используемых в них типов сварных соединений потребовало разработки специальной конструкции инструмента для каждой практической задачи. Так, для соединения пакета из двух и более листов внахлестку разработан инструмент[12] серии Flared Triflute™ (рис. 4, *в*). В нахлесточном сварном соединении свариваемые поверхности раздела соединяемых элементов ориентированы в плоскости, перпендикулярной оси инструмента, в отличие от соединения встык, когда ось инструмента находится в плоскости стыка. Это существенно меняет задачу, решаемую с помощью инструмента. Если при сварке встык инструмент MX Triflute™ должен обеспечивать получение наиболее узкого шва, то при сварке внахлестку необходим более широкий охват контактных поверхностей соединяемых элементов с целью получения наибольшей зоны с металлической связью по контактным поверхностям. Для решения такой задачи были предложены инструменты серии Flared Triflute™ (см. рис. 4, *в*).

Для соединения внахлестку, особенно в изделиях, работающих в условиях усталостного нагружения, важнейшими условиями прочности являются достаточная ширина шва и малая величина отклонения границы соединяемых деталей в зоне ее сближения с границей шва, а также отсутствие скопления частиц оксида на границах [9, 10].

На рис. 4, *в* приведен рабочий стержень инструмента Flared Triflute™ для сварки внахлестку с тремя прямыми проточками, расширяющейся к концу для увеличения диаметра зоны обработки. Благодаря этим особенностям инструмента интенсифицируется течение материала вокруг рабо-

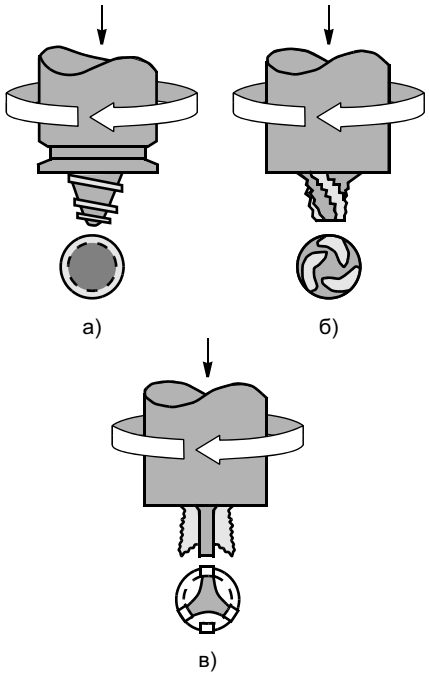


Рис. 4. Инструменты для СТП: *а* — Whorl™; *б* — MX Triflute™ — для соединения встык; *в* — Flared Triflute™ — для соединения внахлестку

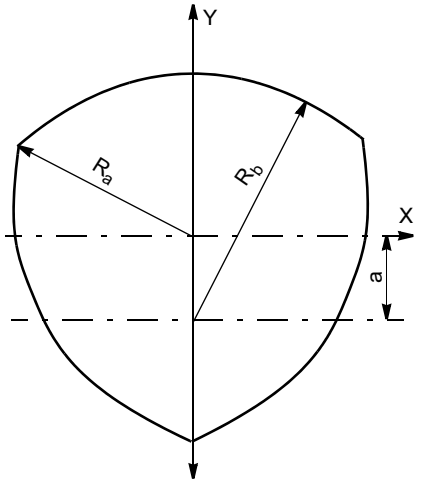


Рис. 5. Форма поперечного сечения рабочего стержня инструмента Trivex™

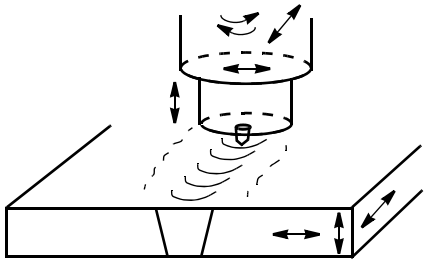


Рис. 6. Направления принудительных колебаний инструмента при СТП

[9] Европейский патент 0810055.
[10] Патент 19953260 (Германия).
[11] Патент 2277465 (РФ).
[12] Патент WO 99/58288.

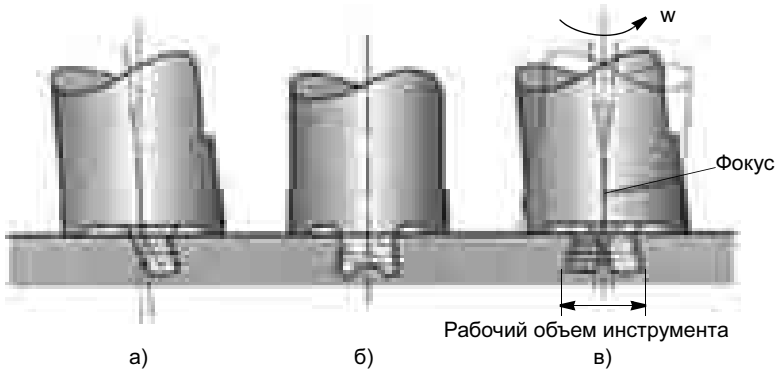


Рис. 7. Принципиальная конструкция инструмента Skew™:
а — вид сбоку; *б* — вид спереди; *в* — вращающийся инструмент

чего стержня и под ним, улучшается перемешивание материала, фрагментизация и диспергирование оксидов в зоне сварки [5].

Большее увеличение рабочего пространства стержня при его вращении без увеличения его собственного объема получено в работе [11] за счет наклона оси рабочего стержня инструмента Skew относительно оси шпинделя станка (оси вращения инструмента) (рис. 7). Положение фокуса на оси вращения влияет на амплитуду орбитального вращения опорного бурта. Особенностью Skew-инструмента является также возможность дополнительного уменьшения объема стержня за счет удаления его внутренней части, поскольку из-за наклона оси стержня она практически не включается в работу над свариваемым материалом при вращении стержня. В работе [5] утверждается, что по сравнению с обычным инструментом применение Skew-инструмента позволило снизить на 20 % осевое усилие, действующее на инструмент, увеличить скорость сварки в 2 раза и получить соединение с лучшими характеристиками. До минимума доведен объем рабочего стержня в серии инструментов[13], что обеспечило их высокую эффективность.

Систематические работы TWI по процессу СТП привели к разработке различных конструкций инструмента и технологических схем этого процесса [11—19 и др.].

В работе [14] описаны особенности технологической схемы сварки Re-Stir™, которая заключается в циклическом возвратно-вращательном движении инструмента[14, 15]. Это решило проблему асимметрии швов, присущую традиционному процессу СТП. Швы имеют симметричную форму (рис. 8) и высокие усталостные характеристики. Однако, по мнению авторов, до промышленного применения процесса Re-Stir™ требуется более детальное его исследование и оптимизация режимов сварки.

Способ СТП с одновременным использованием двух и более инструментов (технология Twin-Stir™) предложен[14] для нескольких вариантов технологической схемы (рис. 9): параллельное перемещение двух инструментов; тандем — перемещение инструментов друг за другом по линии стыка; перемещение инструментов со смещением (Staggered) — для обеспечения проработки краевых зон, что очень важно при соединении внахлестку.

При сварке по варианту Twin-Stir™ с параллельно расположенными инструментами (рис. 9, *а*) возможно утонение верхней пластины (при крутом изгибе границы контактных поверхностей соединяемых пла-

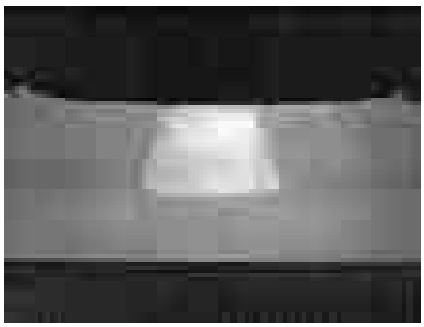


Рис. 8. Макрошлиф шва, выполненного СТП по схеме Re-Stir™ ($v_{св}$ = 198 мм/мин, реверс вращения — через 10 оборотов, сплав 5083, толщина листа 6 мм, инструмент Flared Triflute™)

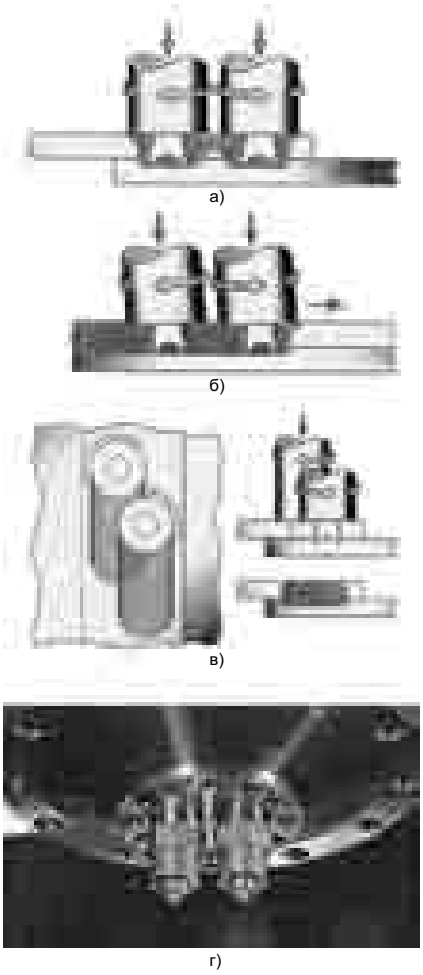


Рис. 9. Варианты технологических схем Twin-Stir™ (*а*—*в*) и экспериментальная головка (*г*) при перемещении инструментов по стыку: *а* — параллельное (Twin-Stir™); *б* — тандем (Tandem Twin-Stir™); *в* — со смещением (Staggered Twin-Stir™)

[13] Патент 6.325273 (США).

[14] Европейский патент 0615480.
[15] Патент WO 96/38256.

стин вблизи границы шва). После отработки конструкции головки и технологии Twin-Stir^{TM} [19] благодаря дополнительному тепловложению можно повысить скорость сварки при меньшей скорости вращения инструмента, уменьшить асимметрию швов, а также уменьшить усилие перемещения и крутящий момент на инструменте.

При сварке по тандем-схеме Twin-Stir^{TM} (рис. 9, *б*) производят дополнительный подогрев первым инструментом, что облегчает работу второго инструмента и позволяет увеличивать толщину соединяемых деталей. В работе [16] отмечается также получение более измельченных зерен и остаточных оксидов в шве.

Схема тандем Twin-Stir^{TM} включает вариант сварки[14] инструментами, расположенными с разных сторон соединяемых пластин. Это позволяет соединять детали вдвое большей толщины. Однако такая схема, так же как и схема Re-Stir^{TM}, нуждается в дальнейших исследованиях.

При технологической схеме сварки Staggered Twin-Stir^{TM} с поперечным смещением двух инструментов относительно друг друга шов первого инструмента частично перекрывают швом второго инструмента (см. рис. 9, *в*), что позволяет формировать зону соединения внахлестку шириной до 4,3 толщины верхнего свариваемого листа. В зоне перекрытия двух швов дополнительно разрушаются остаточные оксиды и измельчается структура. Эффект достигается [16] при встречном вращении инструментов в их передней (в направлении движения по стыку) части.

Рис. 10. Детали из сплава 5083, изготовленные способом Pro-Stir^{TM}

На основе процесса СТП в TWI разрабатывается технологическая схема получения деталей различной формы [13], близкой к чистовой, путем наращивания слоев листового или порошкового материала (технология ProStir^{TM}) (рис. 10). Отмечаются преимущества этого способа перед традиционным методом изготовления таких деталей механической обработкой: относительно быстрый и легко управляемый процесс, требующий меньших площадей под оборудование и энергозатрат; относительно высокоскоростной процесс; трехмерная техника процесса, незначительное коробление; возможность получения разных свойств в разных участках приваркой соответствующего материала; независимость процесса в твердой фазе от гравитации позволяет производить сварку крупногабаритных конструкций.

Можно отметить также технологические схемы с введением в зону соединения дополнительной тепловой энергии, предложенные для СТП деталей с большой толщиной соединяемых кромок или из материалов с повышенной температурой перехода в пластическое состояние. В качестве источников дополнительного подогрева помимо Tandem-TwinStir^{TM} [16] были предложены лазерный луч[16, 17], высокочастотный индуктор[18], активное сопротивление[19, 20]. При подогреве появляется возможность увеличения скорости сварки и уменьшения частоты вращения инструмента, что снижает вероятность перегрева и оплавления металла под опорным буртом.

В работе [12] исследовано воздействие внешнего электростатического поля на металлургические процессы в шве при СТП сплава системы Al—Cu—Mg. Установлено, что под воздействием электростатического поля уменьшается размер субзерен, их распределение становится более равномерным, увеличивается количество дисперсных выделений второй фазы, твердость металла повышается и выравнивается по сечению шва.

При разделении приводов вращения рабочего стержня и корпуса инструмента с опорным буртом стало возможным, не изменяя частоты вращения рабочего стержня, уменьшить частоту вращения опорного бурта и тем самым снизить термический градиент между центральной зоной (около рабочего стержня) и периферийной зоной (под опорным буртом). Это также уменьшает опасность перегрева и оплавления металла под краем опорного бурта, разупрочнения металла в ЗТВ и снижает склонность к коррозии [13].

На ранней стадии разработки процесса СТП во многих работах отмечалось в качестве недостатка образование "кратера" в конце шва после выведения из него инструмента. Этот недостаток особенно усложнял сварку замкнутых (кольцевых, круговых) и других швов при отсутствии припусков. Для выведения инструмента из шва без образования кратера предложено устанавливать на участок перекрытия шва (или в конце шва в стороне от него) технологический клин[21]. Вращающийся инструмент продолжает движение по клину, при этом рабочий стержень выводится на поверхность шва. Однако этот способ увеличивает трудоемкость

[16] Патент WO 02/074479.
[17] Европейский патент 01/08345.
[18] Патент 99/000421 (Норвегия).
[19] Европейский патент 7.716/959.
[20] Патент 98/00613 (Швеция).
[21] Патент 00/00784 (Германия).

процесса и не всегда может быть применен.

Раздельные приводы осевого перемещения и вращения рабочего стержня и корпуса с опорным буртом инструмента позволили отказаться от технологического клина и выполнять замкнутый шов без образования кратера при постепенном подъеме рабочего стержня на поверхность шва и движении вращающегося инструмента по зоне перекрытия начального участка шва. Кроме того, решается ряд других проблем:

— заварка отверстия (сквозного и несквозного), в том числе кратера или отверстия после выборки дефекта;

— возможность сварки одним инструментом деталей разной толщины, а также с переменной толщиной пары соединяемых кромок;

— возможность изготовления рабочего стержня и корпуса инструмента из разных материалов;

— снижение трудоемкости изготовления инструмента и повышение его рабочего ресурса.

Разделение приводов вращения и осевого перемещения стержня и корпуса инструмента обеспечило дальнейшее совершенствование технологических схем сварки и, что не менее важно, развитие ремонтных технологий.

Технологии исправления этих дефектов в большинстве случаев включают операцию заварки отверстия, остающегося после удаления дефектного места. В многочисленных работах подтверждается высокая прочность точечного соединения СТП как после сварки [20, 21, 23—28], так и после ремонта [19, 22, 29—31].

В работе [28] к типовым дефектам швов при СТП относят внутренние несплошности, скопления недостаточно диспергированных оксидов, образующихся при сварке на больших скоростях плит с механически необработанной поверхностью, и корневую несплошность. Можно было бы назвать и другие возможные дефекты.

Для предупреждения корневой несплошности (непровара) между торцами соединяемых кромок[22] предлагается устанавливать под линию стыка технологическую подкладку с канавкой. В этом случае дефектная зона с непроваром выдавливается в канавку и затем удаляется механической обработкой. Однако эффективность канавки под стыком связана с наличием аномальной тепловой границы над канавкой и, следовательно, лучшим прогревом корневой зоны стыка.

Практический интерес представляет предложение[23] использовать вместо рабочего стержня из твердого материала расходуемый пруток из образующего шов материала. При фрикционном нагреве вращающегося прутка под осевым давлением пластический материал прутка наращивается на разогретую поверхность разделки (или отверстия), заполняя ее. Предлагается осуществлять сварку заклепками по аналогичной схеме[24]. Также в отверстие вводят вращающуюся пробку несколько большего диаметра, чем диаметр отверстия, запрессовывают ее, и в результате образуется пробковый шов[25].

Ранее отмечалось, что с увеличением толщины соединяемых деталей растет нагрузка на инструмент, требующая его усиления. С этой целью в работах [32—34] используются разные материалы для рабочего стержня и опорного бурта: для стержня — инструментальная сталь H13, для опорного бурта — сплав MP159 (Co—Ni—Cr). Такой инструмент со спиральной нарезкой на рабочем стержне обеспечил хорошее качество угловых швов толстостенных плит толщиной до 40 мм из алюминиевых сплавов 5083 и 2195 при сварке на следующем режиме: частота вращения инструмента 225 об/мин, скорость сварки 15,2 мм/мин.

Серьезная проблема возникает при сварке материалов с более высокими, чем у алюминиевых сплавов, термомеханическими характеристиками — титановых сплавов, сталей и других материалов. Основным в решении этой проблемы является создание инструмента, работоспособного при высоких напряжениях и температурах.

В работе [33] приведены результаты испытаний пяти материалов для опорного бурта инструмента: суперсплава инконель 718; суперсплава нимоник 105; циркониевой инженерной керамики; твердого сплава (94 % WC + 6 % Co) и интерметаллидного сплава на основе силицида никеля (G-сплав, $Ni_3(Si, Ti, Cr)$. Построены зависимости ширины ЗТВ от скоростей сварки и вращения инструмента, а также от нагрузки для каждого из материалов опорного бурта. На основании анализов этих зависимостей сделан вывод о превосходстве циркониевой инженерной керамики над остальными материалами: расчетная величина тепловложения в шов при использовании этого материала для опорного бурта на 30—40 % выше в зависимости от режима сварки. Это позволяет соответственно повысить скорость сварки. Показано также, что циркониевое покрытие поверхности опорной плиты под стыком также снижает теплоотвод, что позволяет дополнительно повысить скорость сварки с 5 до 15 мм/с.

В ранних публикациях [7, 32] на основании предварительных исследований утверждается, что СТП может быть применена в производстве конструкций из титановых сплавов, сталей и других высокопрочных материалов. В работе [35] сообщается об успешном опробовании СТП сплавов на основе Mg, Zn, Cu, Ti и о возможной перспективе сварки низкоуглеродистой стали, однако не приводятся конкретные результаты.

[22] Европейский патент 0.810.054.
[23] Патент WO 02/05880.
[24] Патент WO 02/062518.
[25] Патент 2368309 (Великобритания).

В работе [36] приведены результаты исследования структуры и механических свойств соединений СТП с предварительным подогревом до 300 °С стали HSLA-65 толщиной 6,4 и 12,7 мм для судостроения. Получены равнопрочные соединения с разрушением при испытании по основному материалу. О технологии СТП стали и применяемом инструменте не сообщается.

Фирмой General Electric Co получен патент[26] на сварку высокопрочных материалов — сплавов титана, никеля. Инструмент изготовлен из тугоплавкого вольфрама с добавками рения, молибдена, тантала или ниобия, образующих с вольфрамом упрочняющие твердые растворы. Инструмент можно также выполнять из жаростойкого карбида вольфрама, полученного спеканием, спеканием и прессованием, а также литьем и прессованием. С применением инструмента, изготовленного из вольфрамового сплава литьем и прессованием, содержащим около 4 % рения и 0,5 % карбида гафния, успешно сварен опытный образец из титановых сплавов в разноименном сочетании: Ti17 + + Ti—6Al—4V.

Изготовлен и испытан инструмент, рабочий стержень которого выполнен из молибдена [37]. При сварке этим инструментом плит из алюминиевого сплава толщиной до 40 мм получено хорошее качество шва, следы износа инструмента не обнаружены.

В Университете Brigham Young совместно с фирмой Advanced Metal Products разработан новый материал [38] на основе поликристаллического кубического нитрида бора PCBN. Инструмент со вставкой из PCBN в виде опорного бурта с рабочим стержнем (рис. 11) был испытан при сварке коррозионно-стойких сталей 316L и 301, а также сплава 600 и сохранял работоспособность при нагреве до 1200 °С. Отмечается повышенная долговечность инструмента: при сварке шва длиной 15 м на стали 316L толщиной 3,2 мм инструмент не разрушился. Долговечность на порядок больше, чем при сварке обычным стальным инструментом.

Необходимо отметить публикации об исследовании особенностей и разработке технологических схем СТП разнородных материалов.

В работе [39] исследовали влияние скорости сварки, позиции оси инструмента относительно линии стыка, его диаметра и направления вращения на формирование и свойства шва при СТП алюминиевого сплава 5083 с низкоуглеродистой сталью (с пределом прочности соответственно 275 и 455 МПа). Показано, что при оптимальной позиции оси инструмента его рабочий стержень должен быть погружен в менее прочный материал (алюминиевый сплав) и немного углублен (на 0,2 мм) в более прочный материал (сталь). Соединение может быть получено только при условии перемещения разогретого до пластического состояния алюминия в активированную зону (рис. 12). В работе [40] отмечается, что при СТП алюминиевого сплава Al 1050 с магниевым сплавом AZ31 условием качественного формирования шва также должно быть согласование направления вращения инструмента относительно линии стыка с направлением скорости сварки. Это условие согласуется с положениями, содержащимися в патенте[26].

В заключение можно отметить, что из зарегистрированных за последние пять лет более 500 патентов по процессу СТП значительная часть касается конструкции инструмента. Однако наряду с интересными решениями информация, содержащаяся во многих из них, либо не является новой, либо не отвечает критерию полезности, либо недостаточно обоснована. Такие патенты засоряют информационное поле и затрудняют поиск полезной информации. Можно согласиться с предупреждением о вреде "наводнения" промышленности большим количеством концепций по инструменту.

Увеличилось число статей и докладов, содержащих результаты глубокого исследования научных аспектов СТП, таких как термомеханические процессы, закономер-

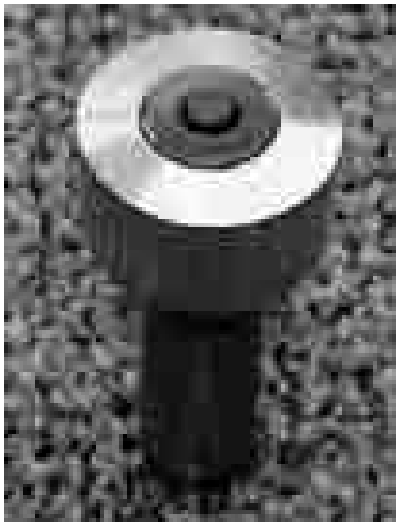


Рис. 11. Инструмент со вставкой из поликристаллического кубического нитрида PCBN с защитной стальной втулкой для восприятия боковых усилий

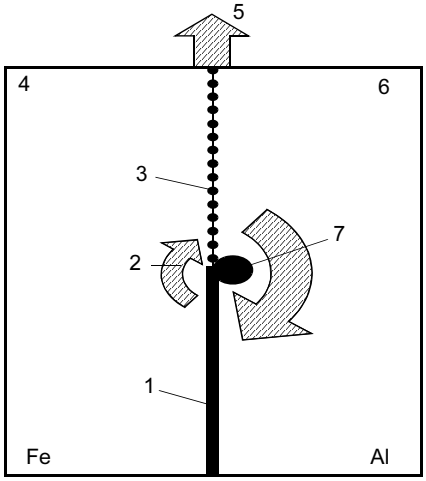


Рис. 12. Технологическая схема СТП алюминиевого сплава со сталью:
1 — активируемая зона; *2* — направление вращения; *3* — неактивированная зона; *4*, *6* — сторона сложения и разности векторов скоростей сварки и вращения инструмента соответственно; *5* — направление сварки; *7* — инструмент

[26] Патент 2.402.905 (Великобритания).

[27] Патент 00/00066 (Норвегия).

ности пластического течения, степенной деформации, формирования структуры зон соединения; система автоматического адаптивного управления параметрами процесса и другие теоретические и экспериментальные исследования. Результаты этих исследований, разработка технологических схем и инструментов для разных практических задач создают основу для разработки и применения технологий СТП в производстве изделий ответственного назначения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Thomas W. M.* et al. Tool technology — the heart of FSW // Connect, July / August 2000, http://www.twi.co.uk/connect/iuly00/c1073a.html
2. *Thomas W. M.* Friction stir welding and related friction process characteristics // 7th Jnalco Conf., Cambridge, 1998. April.
3. *Smith I. J.* Innovations in improvements of friction stir welding tools // Welding Metal Fabrication. 1995. June.
4. *Kalle S.* et al. Industrialization of friction stir welding for application in aerospace structure // Structures and technologies — prospect for future launchers. 3rd European Conference, Strasbourg. 2000. December.
5. *Thomas W. M., Dolbi R. E.* Friction stir welding developments // 6th International conference on Trends in welding research. Georgia (USA). 2002. April.
6. *Thomas W. M.* et al. // Friction Stir welding — developments of tools // TMS Annual Assembly and exposition on joining of Aluminium. New Orleans (USA). 2001. February.
7. *Nicholas E. D., Kalle, Stephan W.* Friction Stir Welding — a decade on // IIW Asian Pacific International Congress. Sydney. 2000. October — November.
8. *Colegrove P., Shercliff H., Threadgill P.* Modelling and development of the Trivex™ Friction Stir Welding Tool // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA). 2003. May.
9. *Cederqvist L., Reynolds A. P.* Properties of Friction Stir Welded aluminium lap joints // 2nd International Symposium on FSW. Gothenburg (Sweden). 2000. June.
10. *Matsumoto Koichi, Sasobe S.* Lap joints of aluminium alloys by Friction Stir Welding // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan). 2001. September.
11. *Thomas W. M.* Skew-Stir Technology // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan). 2001. September.
12. *Fu L., Du S. G.* Metallurgical Characterization of a friction welded aluminum alloy subjected to an external electrostatic field // Welding Journal. 2004. N 8. P. 232—236.
13. *Thomas W. M.* et al. Friction Stir Welding — Process developments for aluminium applications // Conference and exhibition "Aluminim in transport". Moscow (Russia). 2005. April.
14. Reversal stir welding — Re-StirTM — Preliminary trials / W. M. Thomas, D. C. Staines, E. D. Nicholas, P. Evans // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA). 2003. May.
15. *Dual-rotation* stir welding — preliminary trials / E. R. Watts, D. C. Staines, W. M. Thomas, E. D. Nicholas // Published on the internet. 2004. April.
16. *The simultaneous* use of two or more Friction Stir Welding tools / W. M. Thomas, D. C. Staines, E. R. Watts, J. M. Norris // Published on the internet, 2005. 13th January.
17. *Friction* Stir Welding technology — preliminary studies of variant techniques — part 1 / W. M. Thomas, C. Wiesner, D. C. Staines, J. M. Norris // Welding and Cutting Journal. 2006. N 6. P. 339—344.
18. *Catin G. M. D.* et al. Friction Skew — stir welding of lap joints in 5083-0 aluminium // Science and technology of welding and joining. 2005. Vol. 10. N 1.
19. *Friction* based welding technology for aluminium / W. M. Thomas, E. D. Nicholas, E. R. Watts, D. G. Staines // The 8th international conference on Aluminium alloys. Cambridge, UK. 2002. Jule.
20. *A preliminary* investigation on the static properties of Friction Stir Spot welds / C. Schilling, A. Strombeck, J. F. Santos, N. Heesen // 2nd International Symposium on FSW. Gothenburg (Sweden). 2000. June.
21. *Addison A. C., Robelou A. J.* Friction Stir Spot Welding — principal parameters and their effects // 5th International Symposium on FSW. Metz. (France). 2004. September.
22. *Spot* Friction Welding for sheet aluminium joining / T. Y. Pan, A. Joaaynin, D. E. Wilkosz et al. // 5th International Symposium on FSW. Metz. (France). 2004. September.
23. *Shepherd G. E.* The potential for using solid phase welding to repair cracks that may occur on thin aluminium aircraft wing structure // 2nd International Symposium on FSW. Gothenburg (Sweden). 2000. June.
24. *Fujimoto M.* et al. Development of Spot Friction Stir Welding robot system for automobile body members // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan). 2001. September.
25. *Pan T. Y.* Spot Friction weld bond with adhesives for sheet aluminium joining // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal (Canada). 2006. October.
26. *Kyffin W. J.* et al. Recent developments in Friction Stir Spot Welding for automotive steels // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal (Canada). 2006. October.
27. *Badarinarayan H.* Process development and material property evolution of FS stitch welded sheet metal (Al) // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal (Canada). 2006. October.
28. *Uematsu Y.* Effect of welding condition on tensile strength of dissimilar FS Spot welds between different Al alloys // 6th International Symposium on Friction Stir Welding. Montreal (Canada). 2006. October.
29. *Leonard A. J., Lackyer.* Flaws in Friction Stir welds // 4th International Symposium on Friction Stir Welding. Utah (USA). 2003. May.
30. *Johnson R., Threadgill P.* Processing implications from evaluating repaired Friction Stir welds // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan). 2001. September.
31. *Hartley P.* Friction plug weld repair of space shuttle external tank // Welding and Metal Fabrication Journal. 2000. N 9. P. 6—8.
32. *Dawes C. J., Thomas W. M.* Development of improved tool designs for Friction Stir welding of aluminium // 1st International Symposium on Friction Stir Welding, California (USA). 1999. June.
33. *Midling O. T.* Effect of tool shoulder material on heat input during Friction Stir welding // 1st International Symposium on Friction Stir Welding. California (USA). 1999. June.
34. *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. September.
35. *Schuler V.* FSW — Possibilities and application // Proc. of the int. conf. on the joining of materials. JOM-10. Helsingor — Denmark, 2001. P. 238—257.
36. *Konkol P.* et al. Friction Stir welding of HSLA-65 steel for shipbuilding // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan). 2001. September.
37. *Rowe C. E. D., Thomas W. M.* Advances in tooling material for FSW // www.innovaltec.com/iom3_dt/rowe-matcong.pdf.
38. *Sorensen C. D., Nelson T. W.* Tool Material Testing for FSW of High-Temperature Alloys // 3rd International Symposium on Friction Stir Welding. Kobe (Japan). 2001. September.
39. *Kimapong K., Watanabe T.* Friction Stir welding of aluminium alloy to steel // Welding Journal. 2004. N 10. P. 277—282.
40. *Dissimilar* FSW of Al alloy 1050 and Mg alloy AZ31 / S. H. C. Park, M. Michiuchi, Y. S. Sato, H. Kokava // IWC-Korea, 2002.

Р. Н. САЙФУЛЛИН, канд. техн. наук
Башкирский государственный аграрный университет (Уфа)

Прочность сцепления и пористость покрытий, полученных электроконтактной приваркой порошковых композиций

Покрытия, полученные электроконтактной приваркой (ЭКП) порошковых композиций, применяют при восстановлении изношенных деталей машин и в качестве покрытий различного назначения. Состав привариваемого материала может быть различным и зависит от требуемых свойств.

В данной работе исследованы покрытия, полученные ЭКП порошково-полимерных лент (ППЛ), в состав которых входят порошки железа (основной компонент), меди и олова (функциональные наполнители для улучшения трибологических свойств), а также полимер, применяемый в качестве связующего компонента для металлических порошков при ЭКП (поливинилбутираль — ПВБ).

Прочность сцепления покрытия с основой является одной из определяющих характеристик соединения, обусловливающих сохранение в течение достаточно длительного времени работоспособности покрытия при эксплуатации. Прочность сцепления можно определять различными методами: отрывом при нормальном приложении силы, проворачиванием слоя тангенциальной силой, срезом (сдвигом) при приложении силы по оси образца. Учитывая, что большинство восстановленных ЭКП деталей работают в условиях трения скольжения, т. е. восстановленный слой испытывает деформации сдвига, прочность сцепления с основой исследовали на срез согласно методике, приведенной в работах [1, 2].

В качестве основного металла детали применяли образцы из высокопрочного чугуна, вырезанные из коренных шеек коленчатого вала Gh 75-50-3 по ТУ ВАЗ двигателя ВАЗ 2101. Выбор основного металла обусловлен худшей свариваемостью чугуна по сравнению со сталью. Обеспечивая необходимую прочность сцепления с высокопрочным чугуном, можно гарантировать не меньшую прочность сцепления со стальными деталями.

Вырезанные из коленчатого вала образцы после центрового сверления и растачивания шлифовали в центрах на специальной оправке, после чего на них приваривали ППЛ. На токарном станке оправку с образцом крепили также в центрах, и боковые поверхности приваренного слоя обтачивали до ширины 4 мм. Подготовленный таким образом образец продавливали на прессе П-125 (ГОСТ 8905—73) сквозь закаленное стальное кольцо.

Прочность сцепления определяли по формуле

$$\tau = F/\pi db,$$

где F — сила сжатия, Н; d, b — соответственно диаметр образца и ширина покрытия, м.

Оптимальные режимы приварки определяли по критерию максимальной τ, причем содержание функциональных наполнителей и связующего полимера назначали максимальным, так как по результатам поисковых экспериментов при меньшем содержании меди, олова и полимера в ППЛ прочность сцепления увеличивается. Максимальное содержание связующего полимера при определении оптимальных режимов приварки составляло 15 % общей массы навески. При большем содержании полимера (более 20 %) происходит сильная усадка ППЛ под давлением роликов-электродов и покрытие получается очень тонкое (менее 0,3 мм при приварке ленты толщиной 2 мм), наряду с этим значительно ухудшается прочность сцепления.

Максимальное содержание порошков меди или олова соответственно составляло 20 и 10 % общей массы навески, при большем содержании медного порошка в ППЛ уменьшается ее удельное электросопротивление и в контакте частиц Fe—Cu свариваемость затрудняется. При высоком содержании в ППЛ оловянного порошка (более 10 %) приварка затруднена из-за большого выброса перегретого металла (олова) на поверхность покрытия при ЭКП, что обусловливает низкую прочность самого покрытия.

Экспериментально были подобраны оптимальные режимы приварки ППЛ: ток 7,5—8,0 кА, продолжительность импульса сварки 0,04 с, продолжительность паузы 0,06 с, давление роликов-электродов 0,4 МПа (показания манометра установки). Частота вращения детали составляла 2 мин$^{-1}$, приварку выполняли на образцах из высокопрочного

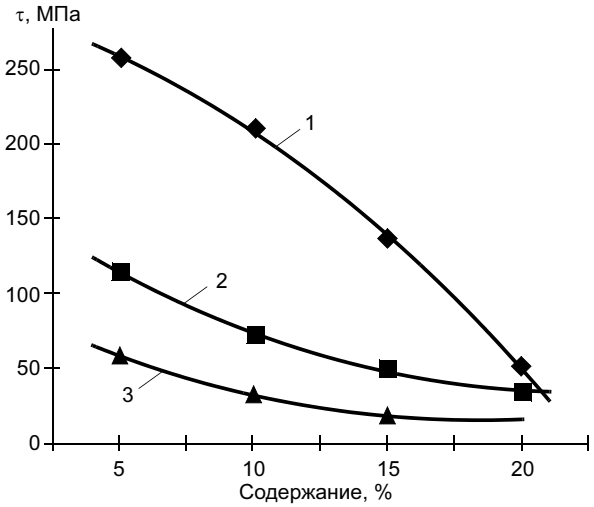


Рис. 1. Зависимость прочности сцепления композиционного покрытия от содержания ПВБ (без порошков меди и олова) (*1*) и порошков меди (*2*) и олова (*3*) при содержании 5 % ПВБ

чугуна диаметром 50 мм, толщина ППЛ составляла 1,0—1,2 мм. Данный режим приварки является жестким, так как характеризуется большой величиной тока и малой продолжительностью импульса и паузы, а также относительно высоким давлением на ролики-электроды.

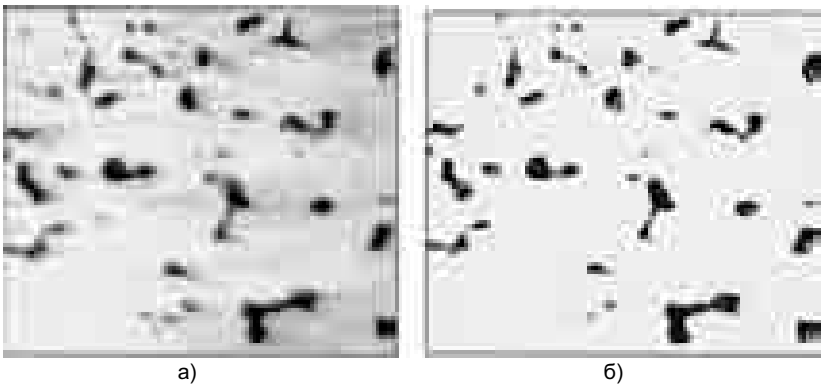
Необходимость жестких режимов при приварке ППЛ с медным порошком обусловлена следующим. При малом $t_{имп}$ и большом $I_{св}$ процессы теплоотвода мало влияют на формирование литой зоны и, учитывая высокое давление роликов-электродов, увеличивается тепловложение в свариваемую точку за единицу времени. При увеличении же $t_{имп}$ в зоне контакта частиц Fe—Cu площадь их соприкосновения растет, следовательно, уменьшаются сопротивление и температура.

На подобранных режимах были получены композиционные покрытия с разным содержанием порошков меди, олова и связующего полимера. Зависимости между составом ППЛ и прочностью сцепления с основой приведены на рис. 1. Видно, что наиболее сильное влияние на прочность сцепления оказывает содержание связующего полимера в ППЛ (его увеличение с 5 до 20 % снижает прочность сцепления более чем в 4 раза). Это объясняется ухудшением приварки из-за продуктов выгорания полимера. Увеличение содержания порошков меди и олова также снижает прочность сцепления, при этом оловянный порошок в ППЛ примерно в 2 раза сильнее уменьшает сцепление по сравнению с медным порошком.

Кроме влияния на прочность сцепления связующий полимер в ППЛ также влияет на пористость покрытия, так как полностью выгорает при ЭКП. Для определения величины открытой пористости покрытия с помощью цифрового фотоаппарата и микроскопа ММУ-1 с заранее подготовленных микрошлифов снимали изображения пористости (для совмещения работы цифрового фотоаппарата и микроскопа подбирали соответствующий объектив). Отснятые кадры покрытий с пористостью обрабатывали с помощью программы визуальной обработки Image.pro, при этом каждую пору на снимке нумеровали и определяли ее площадь (рис. 2). По соотношению площади пор к общей площади кадра определяли величину открытой пористости покрытия.

Значительное изменение пористости покрытий в зависимости от содержания порошков меди и олова не наблюдалось — разница не имела достоверных различий. Результаты изменения открытой пористости покрытий в зависимости от содержания связующего полимера в ППЛ приведены в таблице (все ленты приваривали на одних режимах ЭКП, поэтому пористость зависела только от состава ППЛ).

Как следует из таблицы, при увеличении содержания связующего полимера пропорционально увеличивается пористость покрытия. Этот факт может служить основой для регулирования пористости других покрытий, содержащих нетеплостойкие полимеры.



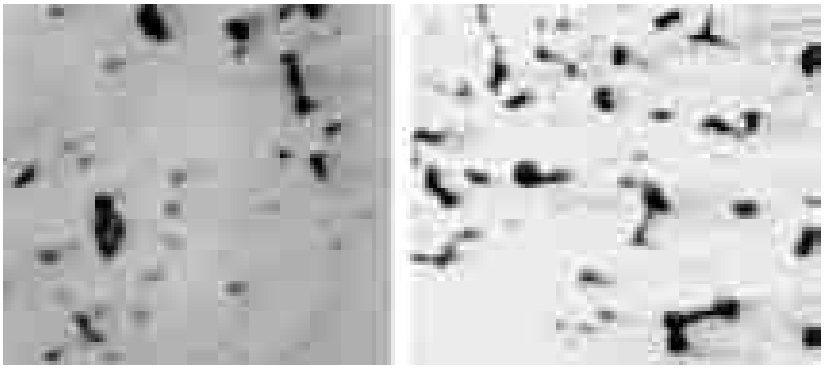
а) б)

Рис. 2. Изображение открытой пористости покрытий до (*а*) и после (*б*) обработки

На рис. 3 приведены снимки поверхности с разным содержанием связующего полимера, а следовательно, и разной пористостью.

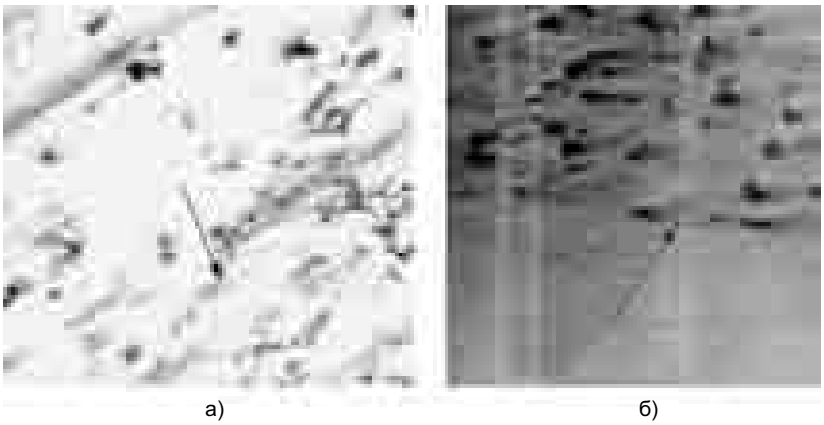
Анализ микроструктуры металла зоны приварки ППЛ на чугунные и стальные образцы показывает, что качество приварки ППЛ без порошков меди или олова или с малым их содержанием (до 1 %) хорошее, хотя и наблюдаются отдельные, прерывистые участки несплавления, качество сцепления покрытия со стальными деталями намного лучше (меньшее количество участков несплавления) (рис. 4).

Содержание связующего полимера в ППЛ, %	Пористость покрытия, %
3	3,5±0,6
10	7,5±0,8
17	12±1,6



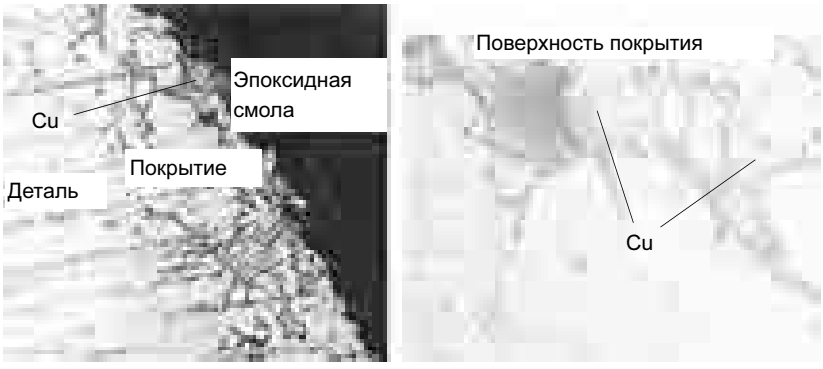
а) б)

Рис. 3. Изображение (×350) пор в покрытии с содержанием полимера 10 (*а*) и 20 (*б*) %



а) б)

Рис. 4. Микроструктура (×170) зоны приварки ППЛ (ПЖРЗ.200.28 + ПВБ — 10%) на высокопрочном чугуне (*а*) и стали 40 (*б*) (граница приварки указана стрелкой)



а) б)

Рис. 5. Частичный выброс перегретого металла (меди) к поверхности покрытия: *а*, *б* — ×100 и 400 соответственно

Большинство частиц меди и особенно олова после ЭКП располагаются ближе к поверхности или границе приварки (рис. 5). Данный факт свидетельствует о том, что при ЭКП температура в зоне приварки выше температуры плавления этих элементов, что вызывает частичный выброс жидкого перегретого металла к поверхности и границе.

Поскольку покрытия после приварки подвергают механической обработке (точению или шлифованию) и поверхностный слой с увеличенным содержанием частиц меди или олова удаляют, то содержание этих порошков в покрытии уменьшается по сравнению с первоначальным содержанием в ППЛ, что является отрицательным фактом.

ВЫВОДЫ

1. С увеличением содержания связующего полимера в порошково-полимерных лентах (ППЛ) значительно ухудшается прочность сцепления покрытия с основным металлом детали, поэтому его содержание не должно превышать 5 %.

2. Порошки меди и олова также снижают прочность сцепления, при этом даже незначительное их содержание в ППЛ (менее 5 %) сильно уменьшает этот показатель, а дальнейшее увеличение их содержания незначительно изменяет прочность сцепления, поэтому для получения высокой прочности сцепления покрытия с основным металлом детали присутствие олова нежелательно, а содержание порошков меди не должно превышать 5 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Агафонов А. Ю.* Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой твердосплавных покрытий: Дис. ... канд. техн. наук. Балашиха, 1990.

2. *Дорожкин И. И.* Методические рекомендации по определению адгезионной прочности покрытий. Минск: Ураджай, 1985. 54 с.

З. М. ХАСАНОВ, канд. техн. наук, Р. Р. АХМЕТЗЯНОВ, инж.
Уфимский государственный авиационный технический университет

Некоторые проблемы расчета и промышленного изготовления упругих чувствительных элементов волоконно-оптических датчиков давления

Введение

Количественные измерения протекающих по трубам жидкостей и газов относятся к группе самых распространенных в промышленности и народном хозяйстве. При разработке современных регуляторов расхода газов применяют новые способы определения массы газов. Однако эти методы при измерениях расхода газов в технологических условиях имеют ряд недостатков [1].

Разработан цифровой регулятор расхода газов, принцип работы которого основан на измерении потока объема газа и его удельной массы. Плотность газа определяется косвенно — путем измерения давления и температуры газа и пересчета их по уравнению состояния газа. На рис. 1 приведена блок-схема цифрового регулятора.

В регуляторе применены вихревой датчик потока объема газов с цифровым термометром[1] и волоконно-оптический датчик давления[2] , характеризующиеся относительно хорошей линейностью метрологических характеристик, отличной повторяемостью, большим диапазоном измерений. Преимущество вихревого датчика — хорошая динамика, значительно лучше, чем у турбинного датчика.

Регулятор содержит внешний контур с адаптивным регулятором расхода газов и внутренний контур с эталонной моделью. Скоростной внутренний контур с блоком самонастройки представляет контроллер на базе двухкристаллического процессора MC 68302 FC20C фирмы Motorola. Применение программируемого контроллера позволило создать адаптивную цифровую схему коррекции нелинейностей в метрологических характеристиках датчиков расхода, давления и температуры. Система с частотой 1000 измерений в секунду проводит необходимые расчеты для определения расхода массы газов.

В адаптивном цифровом регуляторе измеренные значения давления p и температуры T служат для расчета плотности газов по уравнению Клайперона — Менделеева, содержащего коэффициент сжимаемости:

$$\rho = \frac{M}{R}\frac{p}{T}\frac{z_0}{z},$$

где M — масса моля газа; R — универсальная газовая постоянная; z_0 — функциональный коэффициент сжимаемости при давлении 1 Па и температуре 273 К; z — функциональный коэффициент сжимаемости при давлении p и температуре T. Эти зависимости вводят в запоминающее устройство в виде таблицы, а значения внутри диапазонов определяет пересчетное устройство регулятора путем интерполяции.

Значение расхода массы газа q_m пересчетное устройство регулятора определяет путем умножения расхода объема q_v на плотность газа ρ:

$$q_m = q_v\rho.$$

Коэффициент сжимаемости газа z — переменная величина, зависит от давления, температуры и рода газа. Значение этого коэффициента определяют по таблицам, рассчитанным на основе экспериментальных зависимостей. Коэффициент сжимаемости в широком диапазоне температур и давления изменяется незначительно. Например, для азота и

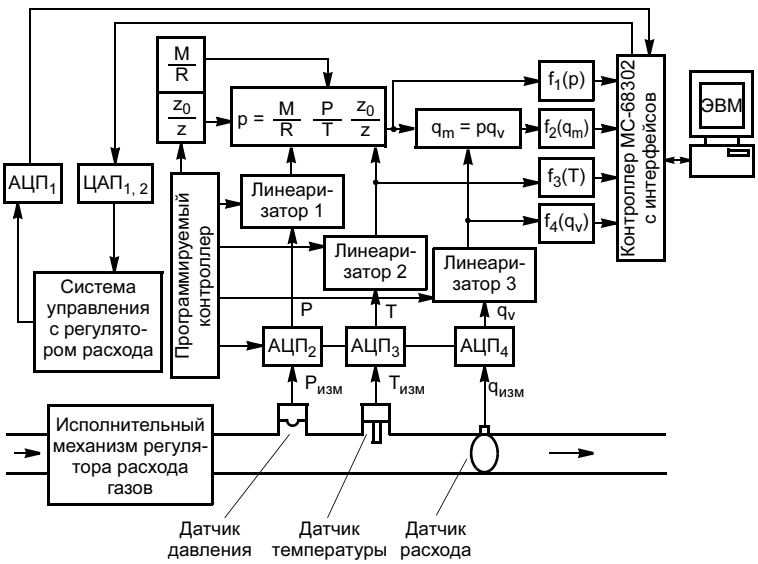


Рис. 1. Блок-схема системы управления расходом газов

[1] А. с. 1659744 (СССР).
[2] А. с. 1504522 (СССР).

ISSN 1562-322X. Технология машиностроения. 2007. № 10

водорода изменение давления 100—300 кПа в диапазоне температур 273—350 К изменяет коэффициенты сжимаемости азота $z_{(N_2)}$ и водорода $z_{(H_2)}$ в диапазоне 0,05—0,30 %. Поэтому для получения более высокой точности расхода вычислительное устройство регулятора учитывает все изменения функционального коэффициента сжимаемости. Для этого случая заранее в запоминающее устройство регулятора записывают данные из таблиц расчета z и интерполяционную программу расчета внутри диапазона z.

На рис. 1 символами обозначены функциональные зависимости, вводимые в запоминающее устройство контроллера, и функции для корректировки нелинейности характеристик датчиков расхода, температуры и давления. При применении этих функций характеристики датчиков сводятся к линейным, уменьшаются систематические погрешности (гистерезис, дрейф нуля, температурные погрешности). Например, если при отсутствии корректировки погрешность измерения датчика расхода газов составляла $\delta = \pm 0{,}3$ %, то после корректировки $\delta = \pm 0{,}06$ % и даже меньше.

Метрологическую характеристику датчиков определяют путем экспериментальной градуировки, заключающейся в выделении ряда точек, определяющих ход кривой. Кривая является графической аппроксимацией результатов измерений, полученных по одному из экспериментальных методов. Нелинейность характеристики любого из трех датчиков представляют в виде $k = \psi(\alpha)$. Тогда аппроксимирующую функцию k определяют по методу наименьших квадратов:

$$k = a_0\alpha^n + a_1\alpha^{n-1} + \ldots + a_{n-1}\alpha + a_n.$$

Значения коэффициентов a_i ($i = 0 \div n$) далее вводят в запоминающее устройство регулятора расхода газов.

Волоконно-оптический датчик давления

Сочетание таких требований, как высокая чувствительность, линейность характеристики, минимальность размеров, высокая циклопрочность, малый гистерезис, малая температурная погрешность, большой диапазон давлений, в том числе способность выдерживать значительные перегрузочные давления, делает разработанный волоконно-оптический датчик давления весьма перспективным.

На рис. 2 приведен волоконно-оптический датчик давления, а на рис. 3 — сечение объединенного конца жгута световодов. Датчик (см. рис. 2) состоит из корпуса *1*, мембраны *13*, зеркального отражателя *3*, установленного в центре мембраны, жгута световодов *6*, объединенные концы *5* которого сформированы в виде чередующихся подводящих *2* и отводящих *3* (см. рис. 3) поток света жгутов световодов. Разделенные концы *9* и *10* жгута световодов (см. рис. 2) подведены соответственно к источнику *12* оптического излучения и фотоприемнику *11*. Каждое подводящее оптическое излучение волокно *9* с двух сторон окружено отводящими оптическое излучение волокнами *10* и, наоборот, каждое отводящее волокно с двух сторон окружено подводящими волокнами.

Датчик работает следующим образом. Отражательная пластина совершает перемещение в соответствии с законом изменения давления и модулирует поток $\Phi_{ос}$ оптического излучения источника. Далее этот модулированный поток через жгут световодов *10* возвращается на светочувствительную площадку фотоприемника, где преобразуется в адекватные по частоте и амплитуде электрические сигналы.

Конструкции волоконно-оптического датчика давления отличаются высокой механической напряженностью и малыми габаритными размерами элементов, сопрягаемых с применением сварки и разъемных соединений. Их разработка для обеспе-

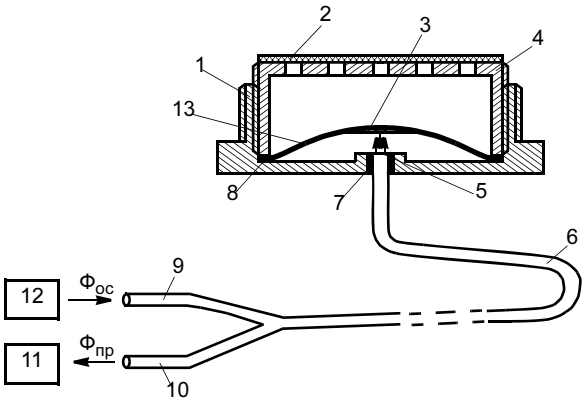


Рис. 2. Волоконно-оптический датчик давления: *1* — корпус; *2* — защитная сетка; *3* — зеркальный отражатель; *4* — цилиндрическая втулка; *5*, *9*, *10* — объединенные и разделенные концы жгута световодов; *6* — жгут световодов; *7* — уплотнитель; *8* — фторопластовый уплотнитель; *11*, *12* — источник и приемник оптического излучения; *13* — мембрана

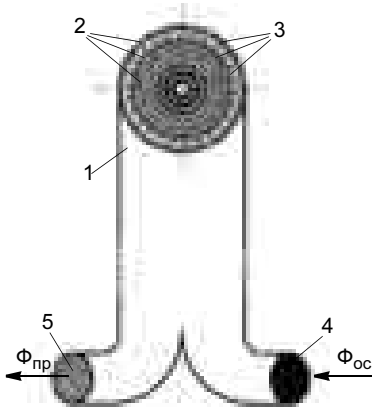


Рис. 3. Сечение объединенного конца жгута (*1*) световодов: *2*, *3* — подводящие и отводящие жгуты соответственно; *4*, *5* — разделенные концы жгута

чения полной безопасности при работе требует проведения соответствующих исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) и несущей способности.

Основными конструкциями датчика давления, прочность которых должна быть обеспечена на весь срок их службы, являются корпуса и упруго-чувствительные элементы, воспринимающие внутреннее давление и переменные температуры. Особенности НДС этих конструкций, работающих в экстремальных условиях, связаны со сложностью формы, большим количеством зон концентрации напряжений и значительными температурными напряжениями. Основные случаи нагружения, которые должны быть учтены при оценке прочности и ресурса конструкций в соответствии с предусмотренными режимами эксплуатации датчиков давления: усилия затяга разъемных соединений; внутреннее давление; температурные перепады в конструкции при стационарном, переменных и аварийных режимах; вибрации элементов конструкций. Циклы пуска и останова датчика давления рассматриваются как повторные нагружения. Действие этих нагрузок оценивается в возможном их сочетании.

Разработка и изготовление волоконно-оптического датчика невозможны без анализа физических процессов, которые определяют используемые технологии. Например, при формообразовании упругих чувствительных элементов датчиков давления механические и эксплуатационные свойства этих деталей определяются процессами фазового перехода, происходящими при технологических процессах [2].

Экспериментальное конструирование, когда волоконно-оптический датчик давления, удовлетворяющий некоторому техническому заданию, выбирается из нескольких опытных образцов, занимает много времени и не дает уверенности в том, что задача решена наилучшим образом.

Как показывает анализ различных упругих чувствительных элементов датчиков давления, в большинстве случаев их хорошей моделью является тонкая оболочка вращения, а важнейшей характеристикой, влияющей на циклопрочность, — величина максимального эквивалентного напряжения. НДС чувствительного элемента может быть определено из решения нелинейной краевой задачи для системы обыкновенных дифференциальных уравнений. В настоящее время методы численного решения нелинейных краевых задач интенсивно разрабатываются, существует ряд апробированных методов. Например, в работе [3] приведены результаты численного решения нескольких задач проектирования мембран.

В Институте механики РАН (Уфа) за последние 10 лет разработано несколько модификаций волоконно-оптических датчиков давления. В ходе выполнения НИР проведен значительный объем расчетных и экспериментальных исследований по улучшению основных характеристик и параметров этих датчиков давления.

Основные размеры конструкций датчиков выбирают при проектировании с проведением первого этапа расчета на прочность по номинальным напряжениям, после чего выполняют уточненный проверочный расчет с определением допустимого числа циклов нагружения и ресурса чувствительного элемента датчика при эксплуатации. При выполнении уточненного второго этапа расчета первоочередной задачей является определение действительных НДС (или наилучшего приближения к ним) для различных эксплуатационных режимов за весь срок службы конструкции датчика со всесторонним изучением местных напряжений и особенностей деформирования материала мембраны. При этом применяют численные методы расчета, измерения на моделях и натурных конструкциях и образцах материала мембраны датчика давления.

Необходимо отметить, что новые, весьма эффективные возможности уточненного расчета деформации и напряжений в различных условиях работы мембран, в том числе для мембран с переменной жесткостью и отражателем в центре, дают современные методы механики, использующие ЭВМ. Однако в рассматриваемых задачах применение только расчетных методов оказывается недостаточным, так как исходные предпосылки расчета не могут быть составлены без экспериментального определения эксплуатационной нагруженности и, кроме того, во многих случаях учет в расчете всех влияющих особенностей сложных конструкций мембран оказывается невозможным даже при использовании мощных ЭВМ. Для решения этих задач применяют экспериментальные методы определения деформаций, напряжений и нагруженности, особенно тензометрию, позволяющую вести измерения на натурных конструкциях датчиков давления при его стендовых и эксплуатационных испытаниях.

В соответствии с этим на последующих этапах проектирования датчика давления проводят уточненное определение НДС выбранной конструкции и характеристик материала оболочки мембраны в условиях эксплуатации оборудования.

Определение деформаций и напряжений мембран на моделях

Тензометрическим исследованиям натурных конструкций мембран предшествуют расчетные и экспериментальные исследования полей и значений деформаций и напряжений на моделях. Результаты расчетов и экспериментальные исследования на моделях позволяют уточнить задачи и условия тензометрии, существенно сократить ее необходи-

мый объем и оценить соотношения деформаций и напряжений в конструкции, применяемые при обработке результатов тензометрии. С использованием этих соотношений по результатам тензометрии натурной конструкции датчика давления могут быть оценены деформации и напряжения в точках, недоступных для тензометрии. Эта задача как некорректная решалась с применением численных методов, позволяющих определять поля напряжений в элементе конструкции мембраны по данным измерений на части его поверхности.

Основные объекты исследования — мембрана, корпус, резьбовые соединения и внутрикорпусные устройства. Измерения проводили на моделях и натурных объектах методами высокотемпературной и динамической тензометрии, термометрии (температура от –10 до 400 °С), поляризационно-оптическим методом на оптически прозрачных моделях датчика давления.

На первой стадии экспериментальных исследований, проводимых при проектировании, когда натурная конструкция датчика не изготовлена, применяли упругие чувствительные элементы, выполненные с соблюдением условий подобия с натурой по форме и нагрузкам. Пересчет измеренных величин с модели на натуру проводили по тем же условиям подобия.

Упругие чувствительные элементы датчиков давления в процессе работы испытывают действие переменных во времени напряжений. Если эти напряжения превышают определенный уровень, то в материале упруго-чувствительного элемента начинают происходить необратимые изменения, приводящие к образованию трещины, которая, постепенно развиваясь, вызывает быстрое разрушение упругого элемента. Так как сталь и другие сплавы представляют собой мелкокристаллический конгломерат, то от внутриструктурных напряжений уже на ранних стадиях деформирования возникают пластические деформации отдельных кристаллитов.

Характер разрушения, связанный с накоплением повреждений и другими факторами, зависит от типа нагружения и материала изделия. При мягком нагружении (постоянная амплитуда напряжения) циклически стабильных материалов с неизменной шириной петли гистерезиса (остаточной деформацией за полуцикл) характер процесса циклического деформирования существенно зависит от степени асимметрии цикла, вызывающей интенсивное накопление деформаций в направлении действия максимального напряжения цикла. Циклически упрочняющиеся материалы характеризуются увеличением ширины петли гистерезиса и суммарной деформации. Накопление деформаций в них также зависит от асимметрии цикла и происходит в направлении действия максимального напряжения. Циклически упрочняющиеся материалы, у которых ширина петли с увеличением числа циклов уменьшается, а пластическая накопленная деформация стремится к некоторой постоянной предельной величине, менее подвержены влиянию асимметрии цикла. Разрушение при малом числе циклов развивается на фоне значительных упруго-пластических деформаций в микрообъемах нагружаемого тела, в которых действуют максимальные напряжения. При мягком нагружении возникают усталостное и квазистатическое разрушения. Разрушение от усталости, связанное с накоплением усталостных повреждений, сопровождается образованием трещин усталости и характеризуется малой пластической деформацией. Такой тип разрушения может наблюдаться при эксплуатации датчиков давления, упругие элементы которых работают при перегрузочном давлении. Квазистатическое разрушение в упруго-чувствительном элементе практически невозможно. С ростом максимальных напряжений интенсивность накопления деформаций резко возрастает, и деформация может достичь предельных значений за весьма малое число циклов. Для развития трещины усталости и последующего разрушения даже на уровне напряжений, близких к пределу прочности, требуется некоторое число циклов, поэтому усталостное разрушение соответствует большей долговечности. Процессы накопления усталостных повреждений и накопления пластических деформаций протекают одновременно, поэтому возможно образование промежуточных форм разрушения.

Кроме уровня напряжений большую роль играет асимметрия цикла. Для циклически стабильных и циклически упрочняющихся материалов асимметрия цикла влияет не только на величину разрушающих напряжений, но и на характер разрушения. Для циклически упрочняющихся материалов при асимметричном цикле нагружения характерно отсутствие значительного накопления деформаций, а деформационные характеристики зависят в основном от амплитуды напряжений цикла. Разрушение носит не квазистатический, а усталостный характер и зависит в основном от амплитуды напряжений. Для оценки долговечности и несущей способности упруго-чувствительного элемента необходимо провести экспериментальные исследования и расчет НДС мембран при различных условиях нагружения.

В работе [4] доказано, что прогнозирование механических свойств мембран предполагает определение характеристик сопротивления деформированию и разрушению в условиях, отличных от условий эксперимента. Это связано с тем, что на характеристики сопротивления деформированию существенное влияние оказывают следующие факторы: абсолютные размеры сечения, концентрация напряжений, качество обработки поверхности, состояние поверхностного слоя (химический

состав, механические свойства, остаточные напряжения от условий изготовления упруго-чувствительного элемента — УЧЭ) и эксплуатационные факторы (температура, коррозия, частота нагружения и др.). Сложность расчета упруго-чувствительного элемента на действие циклических напряжений связана с нестационарностью процесса деформирования, так как амплитудное и среднее напряжения цикла не являются неизменными во времени.

Волоконно-оптические датчики при эксплуатации подвержены действию высоких и низких температур, коррозионной среды. Многие УЧЭ крепятся к корпусам датчиков давления с помощью сварки. Влияние этих факторов снижает усталостную прочность упруго-чувствительного элемента, а пределы выносливости сварных соединений могут быть в 3—8 раз ниже пределов выносливости основного металла. Это связано с тем, что в сварных соединениях возникает концентрация напряжений, ухудшается качество обработки поверхности, возникают остаточные напряжения и дефекты сварки, изменяется химический состав и структура материала. На выносливость сварных соединений еще в большей степени, чем на выносливость упругого элемента, влияют эксплуатационные факторы.

Как показали расчеты НДС УЧЭ, в зоне сварки (жесткий центр или наружный контур мембраны) часто возникают максимальные напряжения. Таким образом, наиболее опасными сечениями в большинстве УЧЭ являются зона крепления мембраны к жесткому центру и зона крепления мембраны к корпусу датчика (при наличии в этих зонах максимальных напряжений или сварных соединений).

Кроме детерминированного подхода к расчету УЧЭ на циклическую долговечность можно использовать вероятностные методы расчета. Изменчивость внешних силовых и эксплуатационных факторов, механических характеристик материала, технологических параметров и т. п. является причиной рассеяния их долговечности, иногда довольно значительной. Расчет на усталость вероятностными методами позволяет определить функцию распределения ресурса УЧЭ и установить связь сроков его службы с надежностью, оцениваемой вероятностью безотказной работы. Результаты расчета характеризуют прочность изделия как фактор надежности, учитывая изменение нагрузки и расчет элементов изделия на выносливость. Выбираемый вероятностный метод расчета на усталость зависит от стадии расчета и проектирования, уровня ожидаемой надежности УЧЭ, объема имеющейся экспериментальной информации и ряда других факторов. На стадии технического проектирования экспериментальный материал практически отсутствует. С целью изучения НДС и оценки характеристик сопротивления усталости возможно проведение испытания на моделях и наиболее точный расчет по методам детерминированного подхода. Окончательно статистические характеристики сопротивления усталости можно получить на стадии эксплуатации исследуемой опытной серии датчика давления.

Так как вероятность разрушения элементов изучаемых конструкций должна быть чрезвычайно малой, например $P < 10^{-7}$—10^{-10} (квантиль нормального распределения $K_p < -6$— -5), то для надежного вычисления требуется большой объем экспериментальной информации, получение которого практически невозможно. Запас прочности в этом случае вычисляют по формуле работы [5]

$$N = Q_{min}/F_{max} \geqslant N_{min},$$

где Q_{min} — минимально возможное значение прочности; F_{max} — максимально возможное значение нагрузки, найденные статистическими методами с учетом возможных случайных вариаций Q и F; N_{min} — минимально допустимое значение, гарантирующее "безусловную надежность".

Значение N_{min} определяется на основе сопоставления результатов расчета с оценкой надежности больших совокупностей изделий в условиях эксплуатации. Надежность такого определения зависит от точности расчетных методов и объема экспериментальной информации об их надежности.

При всем обилии подходов и методов расчета элементов конструкций на циклическую долговечность, при наличии большого числа различных факторов, влияющих на величину долговечности, основным фактором является величина максимального напряжения, возникающего в опасном сечении рассматриваемого элемента конструкции мембраны. Определение напряжений в сечениях УЧЭ производится методами теории упругости без учета изменения напряжений во времени (при статическом характере нагружения).

Математическая модель расчета деформаций и напряжений мембраны с переменной жесткостью и отражателем в центре

Для исследования деформаций и напряжений мембраны с переменной жесткостью и отражателем в центре рассматривали различные математические модели: тонкие пологие и непологие осесимметричные оболочки, оболочки вращения средней толщины с учетом и без учета влияния поперечного сдвига. Однако реальная работа УЧЭ в волоконно-оптических датчиках давления в области малых деформаций позволила в качестве наиболее подходящей выбрать модель тонкой непологой оболочки вращения.

Математическая модель расчета деформаций и напряжений мембраны с переменной жесткостью

и отражателем в центре позволяет решать следующие задачи:

— получение геометрических характеристик УЧЭ, соответствующих заданным значениям рабочего давления и максимального прогиба;

— анализ уравнений, описывающих НДС непологой оболочки вращения мембраны с зеркальным отражателем в центре;

— составление программ расчета деформаций и напряжений в тонкой непологой оболочке вращения и расчет НДС в оболочках заданных форм;

— анализ влияния прогибов в центре и на краях на НДС мембраны.

УЧЭ волоконно-оптических датчиков давления в процессе работы испытывают действие постоянных и переменных во времени напряжений, поэтому в работе необходимо рассмотреть различные методы определения усталостной прочности мембраны и прогибов. Основным фактором, влияющим на усталостную прочность УЧЭ датчика давления, является максимальное напряжение, возникающее в опасном сечении тонкой непологой оболочки вращения.

Нелинейная краевая задача, описывающая поведение мембраны в процессе эксплуатации, может быть представлена в виде обыкновенных дифференциальных уравнений [6]. Авторами получено решение этой задачи, основанное на вычислении НДС частей мембраны с переменной жесткостью и отражателем в центре в зависимости от широкого спектра изменения давления и температуры.

Пусть для мембраны с переменной жесткостью и отражателем в центре уравнения осесимметричного изгиба имеют вид

$$\begin{cases} \dfrac{dU}{dS_0} = (\varepsilon_{10} - 1)\left(\dfrac{V}{r}\cos\psi + q_v\right); \\ \dfrac{du}{dS_0} = (1 + \varepsilon_{10})\cos\psi - \cos\psi_0; \\ \dfrac{dV}{dS_0} = (\varepsilon_{10} - 1)\left(\dfrac{U}{r}\cos\psi + q_u\right); \\ \dfrac{dv}{dS_0} = (1 + \varepsilon_{10})\sin\psi - \sin\psi; \\ \dfrac{dM}{dS_0} = (\varepsilon_{10} + 1)\left(U\sin\psi - V\cos\psi - \dfrac{M_1 - M_2}{r}\cos\psi\right); \\ \dfrac{d\psi}{dS_0} = \theta - \dfrac{\varepsilon_{10} - 1}{\rho_{10}}. \end{cases} \quad (1)$$

Здесь h, r — толщина и радиус мембраны соответственно; μ — коэффициент Пуассона материала мембраны; ψ — угол наклона сечения на контуре мембраны; q — давление на поверхности мембраны. Неизвестные параметры дифференциальных уравнений (1) определяли по формулам

$$\varepsilon_{10} = \frac{U\cos\psi + V\sin\psi}{B_i} + \gamma_1 + \mu_2\left(\gamma_2 - \frac{U}{r_0}\right);$$

$$B_i = \frac{hE_i}{1 - \mu_1\mu_2};$$

$$\theta = \eta_1 + \mu\left(\eta_2 - \frac{\sin\psi}{r_0} + \frac{r\sin\psi_0}{r_0^2}\right) + \frac{M_i}{D_i};$$

$$D_i = \frac{h^3E_i}{12(1 - \mu_1\mu_2)};$$

$$N_2 = \mu(U\cos\psi + V\sin\psi) + E_2h\left(\frac{U}{r_0} - \gamma_2\right);$$

$$\gamma_i = \frac{\alpha_i}{h}\int_{-h/2}^{h/2} T(r)dr;$$

$$M_2 = \mu M_1 - \frac{h^3E_2}{12}\left(\eta_2 - \frac{\sin\psi}{r_0} + \frac{r\sin\psi_0}{r_0^2}\right);$$

$$\eta_i = \frac{12\alpha_i}{h^3}\int_{-h/2}^{h/2} T(r)rdr.$$

Для определения максимального напряжения необходимо провести расчет НДС УЧЭ датчика давления, т. е. проинтегрировать систему нелинейных дифференциальных уравнений при заданных граничных условиях.

Для интегрирования системы дифференциальных уравнений (1) необходимо задавать в аналитическом виде профиль оболочки мембраны. Для аппроксимации профиля оболочки мембраны можно рассмотреть ряд вариантов: аппроксимацию участками парабол второй и третьей степени, аппроксимацию дугами окружностей и участками прямых.

Наиболее удобным видом аппроксимации, позволяющим использовать информацию, заданную непосредственно на проектных чертежах УЧЭ датчиков давления, является аппроксимация меридионального сечения гладко сопряженными дугами окружностей или участками прямых, так как именно в таком виде задается форма мембраны и штамп для ее изготовления.

Рассмотрим аппроксимацию профиля оболочек мембран участками прямых (рис. 4). Определим координаты точек $K(x_3, y_3)$ и $K'(x_3', y_3')$ касания прямых, проходящих через заданную точку $A(x_1, y_1)$ к окружности радиуса R с центром в точке $O(x_2, y_2)$.

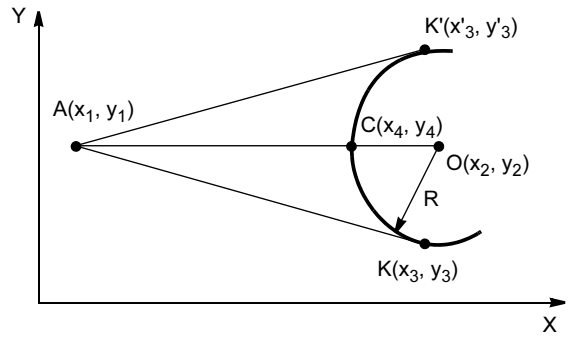


Рис. 4. К расчету профиля мембраны

Расстояние от точки $A(x_1, y_1)$ до центра $O(x_2, y_2)$ найдем по формуле

$$|AO| = L = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2}.$$

Тогда несложно найти и расстояние от точки A до точки K:

$$|AK| = l = \sqrt{L^2 - R^2}.$$

Решим совместно уравнения отрезка прямой AK и окружности радиуса R:

$$\begin{cases} (x_1 - x_3)^2 + (y_1 - y_3)^2 = l^2; \\ (x_2 - x_3)^2 + (y_2 - y_3)^2 = R^2. \end{cases} \quad (2)$$

После несложных алгебраических преобразований получим

$$\begin{cases} y_3 = H \pm \sqrt{H^2 - M}; \\ x_3 = c - \dfrac{b}{a} y_3. \end{cases} \quad (3)$$

Здесь коэффициентами уравнения являются: $a = x_1 - x_2$; $b = y_1 - y_2$; $d = x_1 - c$; $c = \dfrac{l}{2a}[(x_1^2 - x_2^2) + (y_1^2 - y_2^2) - (l^2 - R^2)]$; $H = \dfrac{y_1 - d\frac{b}{a}}{P}$; $M = \dfrac{d^2 + y_1^2 - l^2}{P}$; $P = \dfrac{L^2}{a^2}$.

Приведенные выше формулы положены в основу программы расчета профиля оболочки мембраны ("Программа 1") на языке Паскаль. Структурно программа разбита на три самостоятельных модуля. Отдельными модулями представлены блоки ввода и вывода динамических переменных и блок расчета оптимального профиля оболочки мембраны. В программу включены комментарии, отражающие функциональное назначение программного средства, его структуру и др.

В соответствии с чертежом сначала задают чувствительность мембраны и предварительные значения параметров, описывающих основные геометрические размеры УЧЭ датчика давления. Далее вводят координаты точек $A(x_1, y_1)$, $O_2(x_2, y_2)$ и $C(x_4, y_4)$ окружности, начиная с первой и кончая последней окружностью, аппроксимирующей профиль мембраны. По результатам счета программа в координатной сетке печатает размерную и безразмерную длины отрезка AK, две пары координат точек $K(x_3, y_3)$, $K'(x'_3, y'_3)$. Из двух пар координат точек выбирают нужные значения размерных и безразмерных длин дуг KC и величины углов KOC согласно чертежу мембраны. На последнем этапе программа строит на графопостроителе трехмерное изображение профиля оболочки мембраны.

В основу "Программы 2" положены дифференциальные уравнения (1) расчета деформаций и внутренних напряжений в оболочках с заданными формами УЧЭ. Эта программа позволяет провести расчет НДС внутренней и наружной оболочек мембраны, меридианы которых описываются кривыми из гладко сопряженных прямых или дуг окружностей. Как указывалось ранее, именно такое задание меридиан производится при выполнении чертежей на матрицу при прессовании мембраны. В этом случае угол ψ_i и текущий безразмерный радиус оболочки r_i на i-м участке оболочки можно задать в следующем виде:

$$\psi_i = \psi_{0_i} + \frac{R_{\max}}{R_i}(S_i - S_{0_i});$$

$$r_i = r_{0_i} + B_i \cos\psi_{0_i}(S_i - S_{0_i}) - \frac{R_i}{R_{\max}}(\sin\psi_i - \sin\psi_{0_i}).$$

Причем для прямых участков аппроксимации мембраны принимаем $R_{\max}/R_i = 0$ и $B_i = 1$, а для участков, описываемых дугой окружности, — $B_i = 0$. Необходимо также учесть, что вследствие непрерывности угла поворота сечения $\psi_{i(\text{нач})} = \psi_{i-1(\text{кон})}$. Если дуга окружности направлена выпуклостью вверх, то значения $R_{\max}/R_i$ и $R_i/R_{\max}$ берутся со знаком "плюс", если выпуклостью вниз, то со знаком "минус". Программа также предусматривает ввод на каждом участке числа частей, на которые надо разделить участок и распечатать значения перемещений и напряжений при переходе с одной части участка на другую. Кроме перечисленного выше, рассматриваемая программа требует ввода числовых значений толщины мембраны h; радиуса жесткого центра δ; максимального радиуса оболочки $R_{\max}$; коэффициента Пуассона μ; модуля упругости материала мембраны E; точности вычислений ε; количества участков N на линии, аппроксимирующей меридиан мембраны; начального $\psi_{1(\text{нач})}$ и конечно-

го $\psi_{n(кон)}$ значений углов наклона сечений профиля мембраны (для начального сечения первого участка и последнего сечения последнего участка); конечных значений соответственно горизонтального и вертикального перемещений $U_{кон}$ и $V_{кон}$; начального $q_{нач}$ и конечного $q_{кон}$ значений нагрузки и приращение нагрузки за один цикл расчета Δq.

В качестве примера рассмотрим расчет НДС оболочки арочной мембраны с зеркальным отражателем в центре (рис. 5). Расчет выполнен с помощью программы "Программа 2".

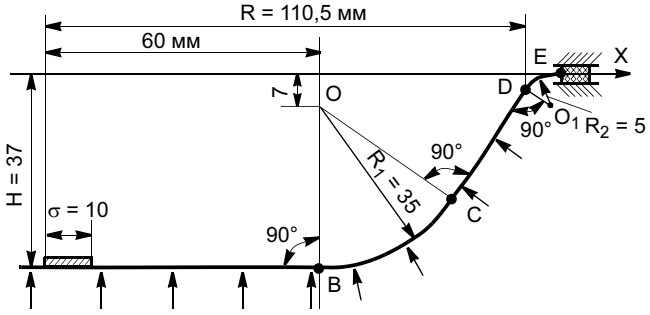
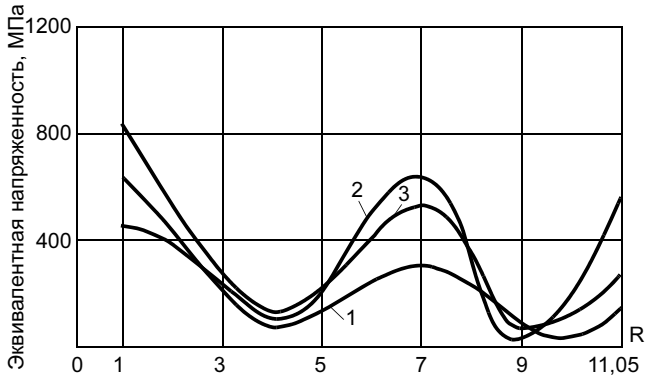


Рис. 5. НДС мембраны с зеркальным отражателем в центре



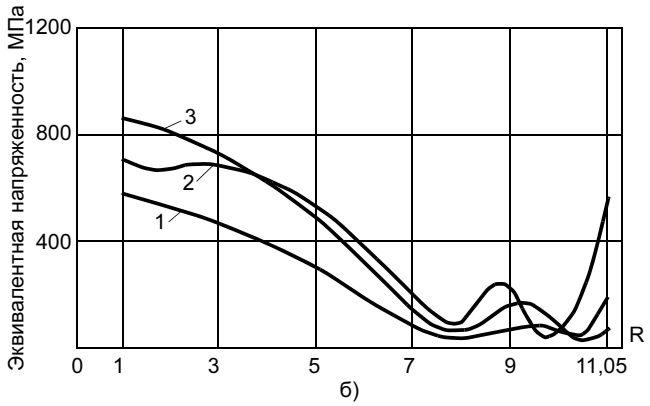


Рис. 6. Эквивалентная напряженность на внутренней (*а*) и наружной (*б*) поверхностях мембраны: *1—3 — q* равно 10, 20 и 40 МПа соответственно

Пусть УЧЭ изготовлен из стали 30Х13 толщиной h = 0,9 мм. Модуль упругости этого материала $E = 2{,}2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона μ = 0,3, пределы прочности и упругости соответственно равны $\sigma_п$ = 1700 МПа и σ_y =1400 МПа, максимальное перегрузочное давление q_{max} = 45 МПа, а остальные необходимые для расчета геометрические параметры оболочки мембраны приведены на рис. 4.

Аппроксимируем профиль мембраны четырьмя линиями: прямыми *AB* и *CD*, дугами *BC* и *DE*. Эта аппроксимация с очень высокой точностью совпадает с меридианом на чертеже проектируемой мембраны.

На рис. 6 приведены изменения эквивалентных напряжений на внутренней и наружной поверхностях мембраны, полученные в результате расчета по программе "Программа 2".

Разработанные программы расчета на ЭВМ позволяют не только получить такие основные характеристики мембраны, как чувствительность и распределение напряжений, но определить максимальные значения этих напряжений и зоны их концентраций. Кроме того, позволят сократить время и материальные затраты на проектирование, улучшить характеристики разрабатываемых датчиков за счет подбора наилучшей формы и размеров упруго-чувствительных элементов. Достоверность методики расчета проверена на ряде модельных задач механики мембран. Расчеты показали высокую точность и достоверность получаемых при расчете результатов.

Таким образом, разработанные программы можно использовать при проектировании различных датчиков давления с целью удешевления проектирования и повышения чувствительности мембраны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Хансуваров К. И., Цейтлин В. Г.* Техника измерения давления, расхода, количества и уровня жидкости, газа и пара. М.: Изд-во стандартов, 1990. 284 с.
2. *Финкель В. М.* Физика разрушения. М.: Металлургия, 1979. 678 с.
3. *Гольденвейзер А. Л.* Теория упругих тонких оболочек. М.: Наука, 1976. 386 с.
4. *Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Иосилевич Г. Б.* Расчет на прочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1993. 640 с.
5. *Ганеев М. С.* Нелинейный осесимметричный изгиб непологой оболочки вращения средней толщины // Тр. семинара по теории оболочек. Казань: Казанский физико-технический институт АН СССР, 1980. С. 29—41.
6. *Валишвили Н. В.* Методы расчета оболочек вращения на ЭЦВМ. М.: Машиностроение, 1976. 278 с.

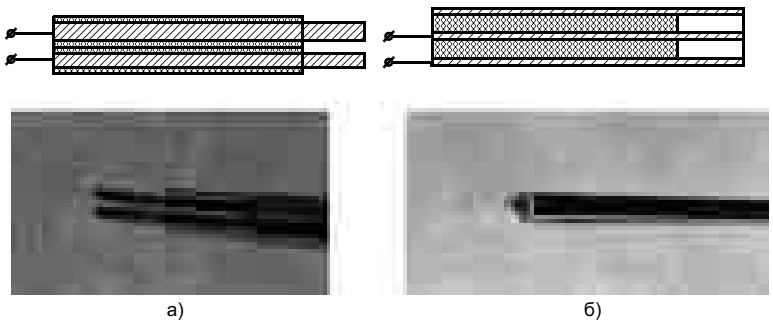
**В. В. СЛЕПЦОВ, д-р техн. наук, А. Ю. ТЯНГИНСКИЙ, канд. техн. наук,
Д. А. ТРЕПОВ, аспирант, М. В. ЦЕРУЛЕВ, бакалавр
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского**

Микроразряды высокой мощности в жидкости

Введение. Одной из актуальных задач развития науки и техники является прямое преобразование электрической энергии в другие виды — механическую, химическую и т. д. При этом в связи с развитием микро- и нанотехнологий большое значение имеет локальность воздействия, а также геометрические размеры области, в которых происходит сам процесс преобразования. Перспективными процессами, решающими эти задачи, являются импульсные микроразряды в жидкости при атмосферном давлении. Подробное исследование данных процессов [1] показывает, что на их основе можно создать перспективные технологии обработки поверхности и жидких сред.

Целью данной работы является изучение воздействия локальных импульсных микроразрядов в воде на биологические объекты.

Электродные системы. Для возможности электроимпульсной локальной обработки биологических объектов в жидкости необходима разработка разрядников с малыми рабочими промежутками миллиметрового и субмиллиметрового размеров. Такие задачи возникают, например, при очистке и стерилизации мединструмента (эндоскопов) с протяженными каналами малого диаметра (3—5 мм). Простейшие конструкции разрядников представляют собой два протяженных, изолированных друг от друга электрода с оголенной разрядной частью, погруженной в жидкость (рис. 1, *а*) и разрядник коаксиального типа (рис. 1, *б*) [2].



а) б)

Рис. 1. Электродные системы параллельной (*а*) и коаксиальной (*б*) геометрии

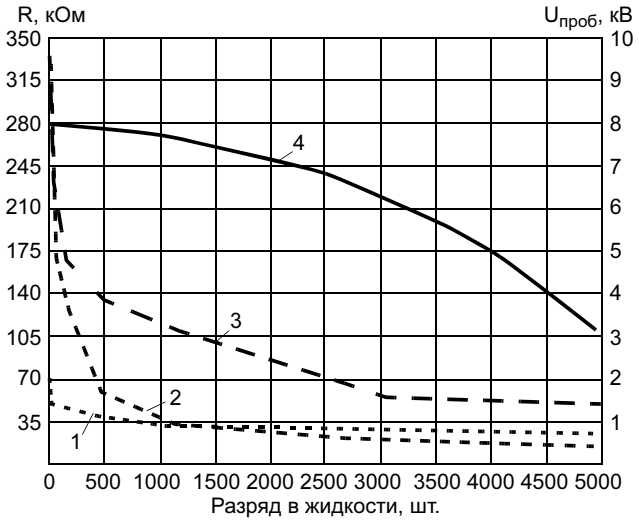


Рис. 2. Зависимость сопротивления (*1*—*3*) и пробивного напряжения (*4*) раствора (исходная жидкость — дистиллированная вода) от количества импульсных разрядов при фиксированных значениях энергии *W*, емкости *C* и напряжения *U*: *1* — Ag—Ag; *2* — W—W; *3* — Cu—сталь

В работе [3] приведены оценки энергии, вкладываемой в разряд, необходимой для возбуждения бактерицидных эффектов — ударной волны и УФ-излучения. Показано, что при энергии, вложенной в разряд, около 1 Дж возникает ударная волна с перепадом давления $\Delta p \approx 10^2$ МПа и коротким пространственным размером фронта около 100 нм. Эта энергия может быть получена в соответствии с известным соотношением $W = CU^2/2$, выбором значений емкости C и напряжения U_p.

Однако просто величина энергии не определит бактерицидного эффекта разряда. Импульс давления в ударной волне (один из установленных бактерицидных эффектов) определяется крутизной фронта вводимого в разряд тока. Отсюда очевидно, что выгодно увеличивать напряжение разряда, снижая емкость C. Однако повышение U_p имеет определенные ограничения. Так, при увеличении напряжения растут токи утечки в жидкости, которые снижают пробивное напряжение и, следовательно, ограничивают получение больших токов разряда, крутого фронта и высокого импульса ударной волны. К тому же эффекту (понижению U пробоя жидкости) [1] приводит накопление в воде ионов (Me^+, OH^- и др.) от разряда к разряду (рис. 2). Особен-

но это заметно в закрытых малых объемах (обработка внутренних полостей) и без прокачки жидкости. Отсюда следует необходимость использования высокоомной жидкости (дистиллированной воды) с проводимостью $q < 5$ мкСм и обязательной прокачки электродов с целью поддержания U на высоком уровне.

Вторая проблема высокого рабочего напряжения связана со стойкостью изоляции, прилегающей к разрядному промежутку. Как известно, пробивное напряжение поверхности изолятора в несколько раз меньше напряжения пробоя через массив диэлектрика.

В случае параллельных электродов (см. рис. 1) разряд преимущественно будет происходить у торцовой поверхности диэлектрика, разделяющего электроды. Кроме того, области диэлектрика, прилегающие к разряду, подвергаются высоким импульсным давлениям, что ведет к их быстрому разрушению и сокращению ресурса работы разрядника. В этих условиях рационально применение тех же принципов, что используются в высоковольтной технике, т. е. удлиненные поверхности диэлектрика, подвергающиеся воздействию высокого напряжения (рис. 3). Такое конструкторское исполнение разрядника значительно увеличивает его ресурс. Однако и в такой конструкции торцы диэлектрика не защищены от разрушения, вызванного кавитацией и ударной волной.

Конструкция осесимметричных разрядников позволяет вывести диэлектрик из зоны ударной волны (рис. 4). Для разрядников данного типа ресурс зависит только от эрозионной стойкости материалов электродов. Наибольшим ресурсом работы обладают разрядники с электродами из тугоплавких металлов [4].

Осциллографические измерения параметров разряда в жидкости. Схема питания разрядника приведена на рис. 5, эквивалентная схема — на рис. 6.

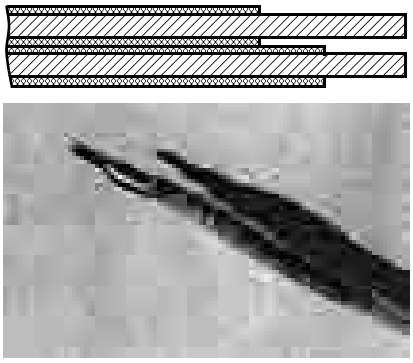


Рис. 3. Разрядники с параллельными электродами и высоким рабочим напряжением

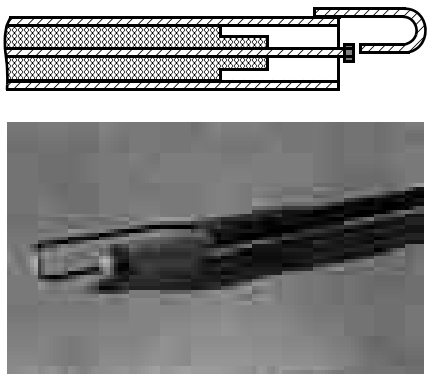


Рис. 4. Осесимметричный разрядник

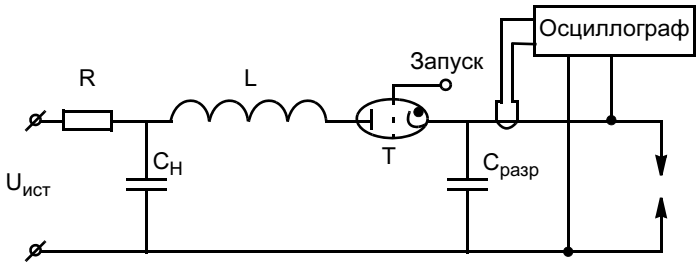


Рис. 5. Схема питания разрядника

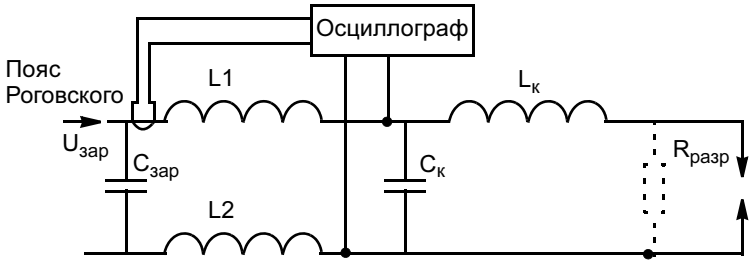


Рис. 6. Эквивалентная схема подключения разрядника к источнику питания ($C_{зар}$ — основная зарядная емкость, $L1$, $L2$ — индуктивности соединительных проводов и обкладок конденсатора соответственно, $C_к$ — емкость коаксиального разрядника, $L_к$ — индуктивность коаксиального разрядника)

Осциллографические измерения параметров разряда в жидкости проводили при помощи осциллографа Agilent с полосой 60 МГц. В качестве датчика тока использовали пояс Роговского, для измерения напряжения — высоковольтный делитель 1:1000. Основными разрядными емкостями служили безындукционные конденсаторы. Емкость варьировали в пределах 0,1—0,01 мкФ, напряжение $U_{зар}$ = 3÷10 кВ. Индуктивность разрядного контура, включающая индуктивность кабеля и коаксиального разрядника, $1{,}5 \cdot 10^{-5}$ мкГн. Разрядный промежуток 0,5—1,0 мм. Рабочая жидкость — дистиллированная вода.

На рис. 7 приведены графики разрядного тока и напряжения на

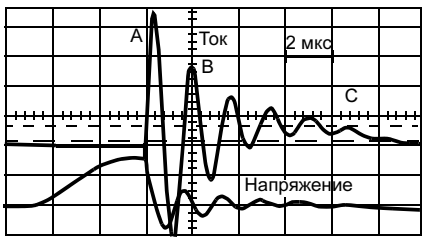


Рис. 7. Графики разрядного тока и напряжения на электродах

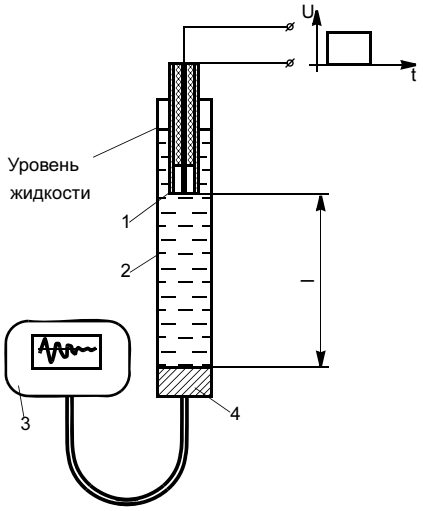


Рис. 8. Схема установки для измерения гидродинамических параметров разряда в жидкости: *1* — разрядник; *2* — трубка ПВХ диаметром 10 мм; *3* — осциллограф Agilent 54621A; *4* — датчик удара

электродах. На графике тока выделяются три характерных участка.

Участок А. Лавинообразное развитие разряда, формирующее крутой токовый фронт $1{,}14 \cdot 10^9$ А/с. Скорость нарастания тока разряда определяется индуктивным и омическим сопротивлением цепи разряда и напряжением на разрядных емкостях, которые состоят из собственно разрядной емкости $C_{разр}$ и емкостей коаксиальной линии $C_л$ и самого разрядника $C_р$. Последние две емкости, хотя и имеют небольшое значение (около 50—100 пкФ), определяют крутизну токового фронта, так как подключены прямо (минимальная индуктивность проводов) к разрядному промежутку. Первый токовый импульс имеет размах до 3—5 кА и время нарастания $\tau \approx 20$ нс. Этот импульс возбуждает затухающие колебания (участок *А*) с частотой $F \approx 35 \div 40$ МГц, определяемой $C_л + C_р$ и индуктивностями коаксиального кабеля и разрядника.

Участок В. С некоторой задержкой, определяемой собственной индуктивностью, начинает разряжаться основная емкость $C_р$. При этом в разрядной цепи возникают затухающие колебания частотой $F \approx 2$ МГц. Декремент затухания определяется в основном сопротивлением разрядного промежутка и варьируется случайным образом вокруг значения сопротивления $R_р \approx 5$ Ом.

Участок С. "Гладкий" импульс. Продолжение разряда в виде дуги при низком напряжении на электродах. Через дугу происходит разряд накопительного конденсатора $C_н$, в течение времени определяемый величиной емкости этого конденсатора и сопротивлениями в цепи разряда. Регулирование этих величин (например $C_н$) позволяет управлять величиной эрозии электродов, что необходимо при получении коллоидных растворов.

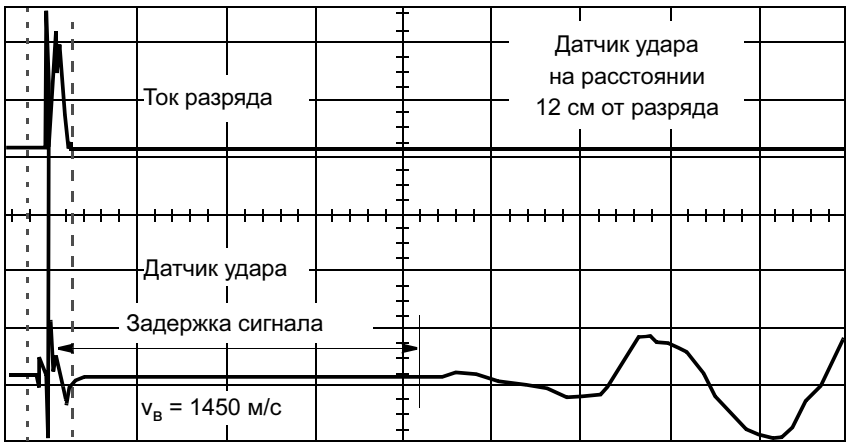


Рис. 9. График сигнала с датчика удара, совмещенный с токовым сигналом разрядника

Для измерения гидравлических параметров разряда в жидкости использовали датчик удара из пьезокерамики размером 4 × 3 × × 2 мм. Измерения проводили на установке (рис. 8) как в "открытой" воде (размеры сосуда намного больше характерных размеров разрядника), так и в трубах, заполненных жидкостью. Рабочая жидкость — дистиллированная вода. Гидроудары в жидкости регистрировали с помощью двухканального осциллографа Agilent 54621A.

На рис. 9 приведен график сигнала с датчика удара, совмещенный с токовым сигналом разрядника. В качестве разрядника использовали коаксиальный разрядник диаметром 3 мм с центральным электродом из W. Видно, что ударная волна возбуждается крутым токовым фронтом *А* и распространяется по трубке, заполнен-

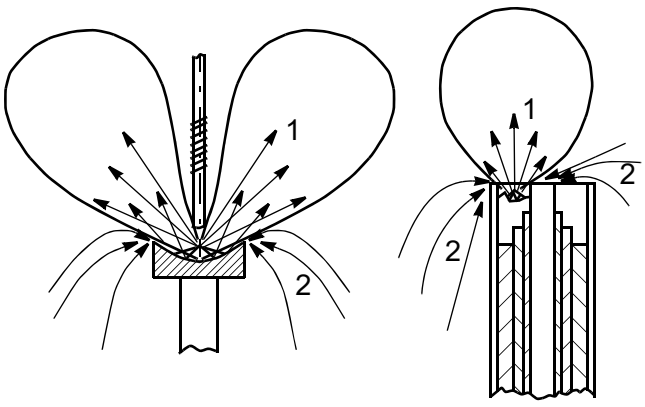


Рис. 10. Диаграммы направленности излучения ударной волны и высокоскоростных струй жидкости разрядников различной конструкции: *1* — инжекция высокоскоростных струй; *2* — поток жидкости в область пониженного давления

ной водой, со скоростью $v_в$ = = 1450 м/с, что совпадает по величине со скоростью распространения звука в воде.

Поворот продольной оси разрядника относительно направления на датчик удара позволил построить диаграммы направленности излучения ударной волны разрядников различной конструкции (рис. 10). Измерения проводили в сосуде относительно большого объема.

Исследования гидравлического эффекта импульсного разрядника проводили по схеме, приведенной на рис. 11. Интенсивность инжекции жидкости из области разряда оценивали высотой подъема жидкости *h*. Частота следования импульсов 1 Гц. Соотношение $d_т/d_р \approx 1{,}2$. Подъем столба воды при энергии импульса около 0,5 Дж изменялся от 0 до 50 мм в зависимости от расстояния *l* между торцами трубки и разрядника.

На рис. 12 приведена зависимость уровня подъема жидкости *h* от положения трубки *T* относительно разрядника. Следует отметить отсутствие выброса жидкости, когда разрядник находится внутри трубки. Действительно, новый объем может появиться в момент горения разряда ($\tau \approx 5$ мкс) в виде парогазового пузыря размером, определяемым вложенным электрическим зарядом. В данном случае $W \approx 1$ Дж и межэлектродный зазор 1 мм. Но этот объем относительно невелик (около 3—5 мм). Объем жидкости, поднявшейся в трубке $V = h\frac{\pi d_т^2}{4} \approx 3\ см^3$. Очевидно, что ударные волны разряда формируют гидропоток с диаграммой направленности, зависящей от геометрии электродов разрядника (см. рис. 10).

Энергию в разряде рассчитывали с помощью программы MathCAD. Для этого значения тока и напряжения на цифровом осциллографе сохраняли в формате электронных таблиц, после чего загружали в программу и строили графики. Энергию в импульсе рассчитывали как интеграл от произведения тока и напряжения разряда. Полученное значение энергии разряда (1,082 Дж) позволяет говорить о том, что данный вид разряда способен оказывать дезинфицирующее воздействие на микроорганизмы.

Эксперименты по обеззараживанию проводили на трубках, изготовленных из силиконовой резины (рис. 13). Внутренний диаметр трубок порядка 4 мм. Трубки разрезали на части длиной 50—70 мм. Внутренняя поверхность трубок заражалась бактериями. Бактерицидность обработанной разрядами воды была проверена на штаммах бактерии E. coli. Результаты эксперимента приведены в таблице.

Результаты исследования позволили выделить ряд факторов, влияющих на результат обработки. Среди них следующие:

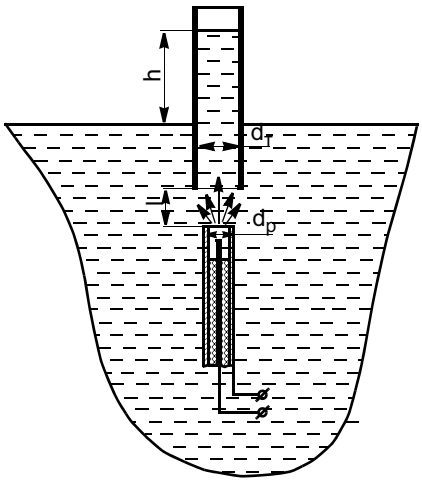


Рис. 11. Схема эксперимента для измерения инжекции жидкости из разрядника

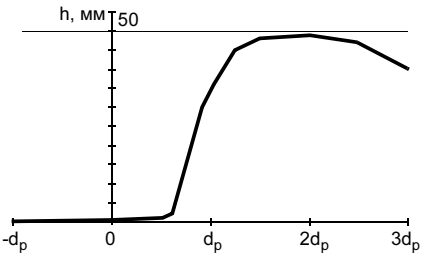


Рис. 12. Зависимость высоты подъема жидкости *h* от расстояния между торцем трубки *T* и торцем разрядника (величина *l*)

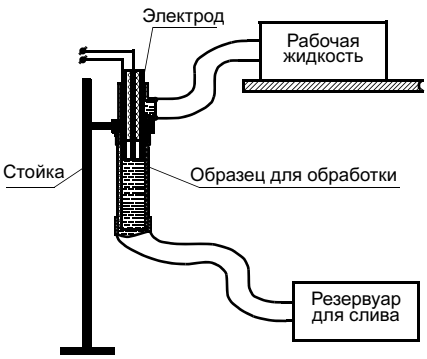


Рис. 13. Схема установки для экспериментов по очистке и стерилизации трубок

Шаг обработки, см	Конструкция электрода	Жидкость	Выдержка перед обработкой	Результат эксперимента[2], %
0,5	Осесимметричная	Водопроводная вода	+	80
0,5	"	Дистиллированная вода	+	100
0,5	"	То же	–	80
0,5	"	Подготовленная вода[1]	+	100
1,5	"	Дистиллированная вода	+	60
0,5	Коаксиальная	То же	+	70

[1] Подготовленная вода — дистиллированная вода, обработанная электроразрядами с использованием серебряных электродов.
[2] Приведено количество стерильных трубок.

— обработка трубки с протоком жидкости;

— выдерживание трубок в подготовленном заранее дезинфицирующем растворе;

— шаг обработки;

— количество импульсов;

— напряжение разряда;

— энергия импульса;

— конструкция электродной системы (ЭС);

— вид используемой жидкости.

Некоторые из приведенных факторов следует учитывать во всех случаях:

— обработка трубки с протоком жидкости;

— напряжение разряда около 8 кВ. При данном напряжении дезинфекция происходит с максимальным эффектом, увеличивать напряжение далее не имеет смысла, а также это предельные возможности установки;

— энергия импульса около 1 Дж. Данное значение энергии является основным критерием дезинфекции, согласно данным научно-технических публикаций.

Остальные факторы требуют дополнительной экспериментальной проверки.

Можно наглядно показать значимость каждого из факторов (рис. 14).

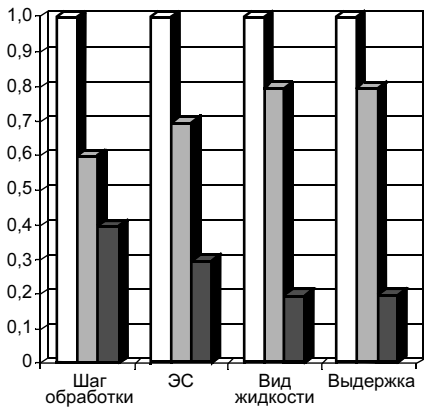


Рис. 14. Эффективность варьирования параметров (■) (□ — максимальное воздействие фактора, ■ — минимальное)

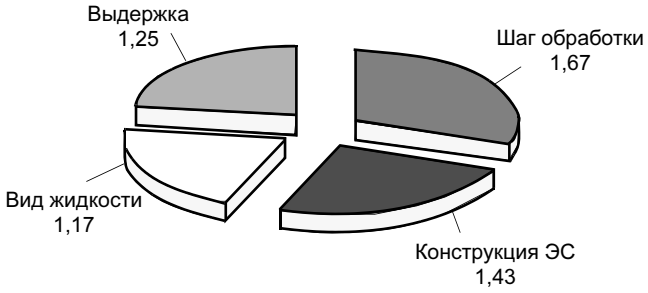


Рис. 15. Влияние каждого фактора на результат эксперимента

Исходя из полученных экспериментальных данных, можно рассчитать условный весовой коэффициент влияния каждого параметра по следующей формуле:

$$K = \frac{N_{\text{пол}}}{N_{\text{отр}}},$$

где $N_{\text{пол}}$, $N_{\text{отр}}$ — лучший и худший результат эксперимента при данном параметре (в сотых доля).

Результаты расчета приведены на рис. 15.

ВЫВОДЫ

1. Разработаны методика формирования локальных импульсных микроразрядов в воде и конструкция электродной системы, а также исследована динамика преобразования электрической энергии в механическую. Установлены три режима генерации электрических колебаний в цепи в момент возникновения и развития разряда. Показана взаимосвязь электрических характеристик разряда с гидродинамикой жидкой среды.

2. Установлен эффект биоцидного действия микроимпульсных разрядов в жидкости, определены основные факторы воздействия и произведена оценка масштаба их влияния при очистке и стерилизации различных объектов.

3. Предлагаемая методика позволит разработать:

— систему очистки и стерилизации объектов (до 3 м) с тонкими каналами (до 3 мм), включая медицинские эндоскопы различного назначения;

— устройства для очистки и стерилизации жидких сред, включая питьевую воду, которые могут использоваться как в стационарных бытовых условиях, так и нестационарных и критических ситуациях, производительностью от л/мин до м^3/мин.

— системы локального воздействия на живые и неживые объекты с целью разрушения не свойственных этим объектам новообразований;

— устройства доставки и активации жидких и гетерогенных сред, включая топливные смеси и суспензии, к рабочим органам без использования подводящих трубопроводов высокого давления.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Юткин Л. А.* Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. Л.: Машиностроение, 1986, 253 с.
2. *Гулый Г. А.* Научные основы разрядно-импульсных технологий. Киев: Наукова думка, 1990.
3. *Пролонгированная* микробная устойчивость воды, обработанной импульсными электрическими разрядами / В. А. Коликов, В. Е. Курочкин, Л. К. Панина и др. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 2. С. 118—125.
4. *Электрический* разряд в жидкости и его применение / Под ред. Г. А. Гулого. Киев: Наукова думка, 1977.

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

Применение керамических труб в горизонтальной печи, эксплуатирующейся при температуре до 1600 °С

На современном уровне развития промышленности температурные измерения составляют значительную часть (около 40 %) общего объема всех измерений. Вследствие этого в эксплуатации находится широкая номенклатура средств измерения температуры, требующих периодической поверки. Если для термопреобразователей сопротивления и термоэлектрических преобразователей, работающих при температуре до 1200 °С, существует широкая номенклатура поверочных средств, то для поверки термопар типа ТПР (В) в нашей стране не производилось серийно метрологическое оборудование, а конкретно печи, в которых можно реализовать метод сличения согласно ГОСТ 8.338—2002. Основной проблемой построения такой печи является сложность изготовления нагревателя, надежно работающего на воздухе при температуре свыше 1600 °С, и жаропрочной керамической трубы необходимой механической прочности из теплоизоляционного материала с низким коэффициентом теплопроводности в данном диапазоне температур. Не касаясь нагревателя и теплоизоляции, хотелось бы остановиться на вопросе выбора и применения керамической трубы при построении горизонтальной трубчатой печи, работающей при температуре до 1600 °С (рис. 1).

Применение керамической трубы обусловлено необходимостью защиты высокочистого металла термоэлектрического преобразователя от загрязнения веществами, выделяющимися в процессе работы нагревателя и теплоизоляции. Может возникнуть вопрос, почему именно горизонтальной печи. Преимуществами горизонтальной печи по сравнению с вертикальной являются малый теплоотвод в рабочей зоне печи вследствие меньшей конвекции воздуха, возможность поместить спаи образцового и поверяемого термоэлектрических преобразователей рядом друг с другом, расположив термопары с разных сторон печи, и легкость получения изотермического поля в центре печи. Недостатком же горизонтальной печи, особенно при 1600 °С, является особенность закрепления керамической трубы в виде балки с защемленными концами. Отсюда вытекает основное требование к керамической трубе: труба не должна деформироваться при 1600 °С под воздействием своего веса.

Первоначально при конструировании печи использовали керамическую трубу КВПТ производства ОАО "Огнеупоры" (г. Богданович). Технические параметры керамики и трубы из нее приведены в табл. 1.

Керамика имела хорошую механическую прочность при 1600 °С, и к настоящему времени труба проработала уже более 600 ч. Фотография трубы после данного срока эксплуатации приведена на рис. 2, *а*. К сожалению, производство данной трубы было прекращено. Для ее замены попытались использовать керамическую трубу МК-821 производства ОАО "Поликор" (г. Кинешма). Технические параметры керамики и трубы из нее приведены в табл. 2. Трубу установили в печь и выдерживали при 1600 °С в течение 4 ч. Механическая прочность керамики при данной температуре оказалась недостаточной и труба прогнулась.

Таблица 1

Показатель	Труба КВПТ
Содержание Al_2O_3, %	⩾97
Открытая пористость, %	⩽5
Температура эксплуатации, °С	1600
Габаритные размеры, мм:	
наружный диаметр	50
внутренний диаметр	40
длина	600

При третьей попытке испытывали керамическую трубу ОТМ-959 (содержание $Al_2O_3 \geqslant 93$ %) производства ФГУП ОНПП "Техноло-

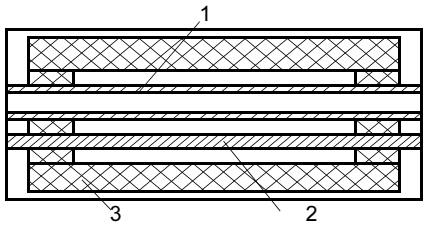


Рис. 1. Схема горизонтальной печи, эксплуатирующейся при температуре до 1600 °С: *1* — керамическая труба; *2* — нагреватель; *3* — теплоизоляция

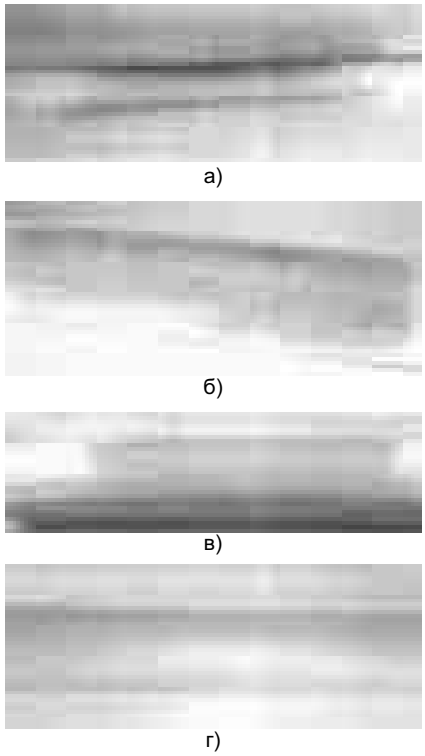


Рис. 2. Труба из керамики КВПТ (*а*), ОТМ-959 (*б*), ОТМ-959-1 (*в*) и С799 (*г*) после нагрева

Таблица 2

Показатель	Труба МК-821
Содержание Al_2O_3, %	⩾82
Открытая пористость, %	⩽27
Кажущаяся плотность, г/см^3	2,4
Предел прочности при сжатии, МПа	40
Температура деформации под нагрузкой, °С	1580
Габаритные размеры, мм:	
наружный диаметр	50
внутренний диаметр	40
длина	620

Таблица 3

Показатель	Труба ОТМ-959
Содержание Al_2O_3, %	⩾93
Открытая пористость, %	⩽16,2
Кажущаяся плотность, г/см^3	3,09
Предел прочности при сжатии, МПа	140
Температура эксплуатации, °С	<1800
Габаритные размеры, мм:	
наружный диаметр	65
внутренний диаметр	40
длина	550

Таблица 4

Показатель	Труба С 799
Содержание Al_2O_3, %	⩾99,7
Открытая пористость, %	Без пор
Температура эксплуатации, °С	⩽1800
Габаритные размеры, мм:	
наружный диаметр	24
внутренний диаметр	18
длина	550

гия" (Обнинск). Технические параметры керамики и трубы из нее приведены в табл. 3.

Под габаритные размеры данной трубы была изготовлена новая печь. Испытания проводили в течение 40 ч при 1600 °С. Труба не прогнулась, но из-за большой толщины стенок и, соответственно, большого температурного градиента в стенке трубы образовались трещины (рис. 2, *б*). Кроме того, из-за большой толщины стенок трубы возникла значительная разница между температурой нагревателя и температурой в центре трубы. Для экспериментального подтверждения этого факта необходимо было во время работы печи при 1600 °С измерить данные температуры. Поскольку нагреватель во время работы печи находится под напряжением, воспользоваться контактными средствами измерения температуры не представлялось возможным, поэтому температуру нагревателя (1636 °С) и температуру в центре трубы (1512 °С) измеряли бесконтактным методом с помощью пирометра ПД-4 производства ОАО НПП "Эталон" (Омск).

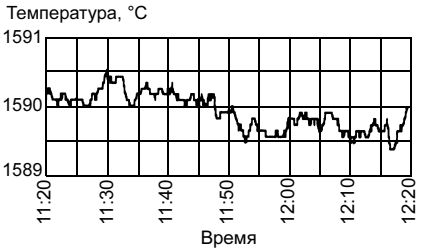


Рис. 3. Стабильность поддержания температуры в рабочей зоне печи ВТП 1600-1

Рис. 4. Зависимость температуры в рабочей зоне печи ВТП 1600-1 от расстояния от центра трубы (1): *2* — допуск по ГОСТ 8.338—2002

По замечаниям авторов в ФГУП ОНПП "Технология" был изменен химический состав керамики и изготовлена керамическая труба ОТМ-959-1, проработавшая при 1600 °С в течение 100 ч и показавшая удовлетворительные прочностные характеристики с сохранением недостатка — значительной разницы между температурой нагревателя и температурой в центре трубы. Для поддержания в рабочей зоне трубы температуры 1600 °С приходилось поддерживать на нагревателях температуру около 1700 °С, что значительно снижало ресурс работы печи. Труба после данного срока эксплуатации приведена на рис. 2, *в*.

Чтобы повысить ресурс печи, мы стремились уменьшить температуру нагревателя, и, следовательно, нужно было уменьшить разницу температур между температурой нагревателя и температурой в центре трубы. Для выполнения этой цели мы начали использовать керамическую трубу С 799 производства фирмы Limatherm (Польша) со стенкой толщиной 3 мм. Химический состав керамики и технические параметры трубы приведены в табл. 4.

Данная керамика имеет лучшие показатели из всех вышеперечисленных типов керамики, труба из этой керамики проработала при 1600 °С уже более 100 ч. На рис. 2, *г* приведена труба после данного срока эксплуатации. В настоящее время данную трубу применяют при серийном изготовлении высокотемпературной печи ВТП 1600-1. Стабильность поддержания температуры и перепад в центре трубы приведен на рис. 3 и 4.

Таким образом, применение керамических труб в горизонтальной печи, работающей при температуре до 1600 °С, вполне возможно при наличии комплектующих удовлетворительного качества и позволяет на практике получить все преимущества горизонтальных печей. К сожалению, производство керамики в нашей стране не удовлетворяет требованиям современных потребителей и даже не может повторить номенклатуру, производимую во время существования Советского Союза. В этой связи наше предприятие для обеспечения требуемых технических характеристик своей продукции все больше переходит на использование импортных комплектующих, и в частности керамики.

С. Б. КРАСИЛЬНИКОВ, Г. И. СОНИН
ЗАО "Синтез НДТ" (С.-Петербург)

Рентгеновский радиометрический контроль кольцевых сварных соединений при строительстве магистральных газопроводов

Необходимость обеспечения надежной работы магистральных газопроводов с одновременным сокращением затрат на контроль качества требует повышения доли современного автоматизированного оборудования, использующего цифровую обработку видеоизображения и имеющего показатели качества контроля не хуже, чем при традиционных методах НК.

Для проведения радиационного контроля при строительстве магистральных газопроводов разработана и изготовлена опытно-промышленная радиометрическая установка (РМУ), которая может эксплуатироваться как с рентгеновскими аппаратами, так и с радионуклидными источниками. Ее применение значительно повысит оперативность и объективность радиационного контроля, уменьшит временные и финансовые затраты, долю ручного труда, позволит архивировать результаты контроля в цифровом виде.

Принцип работы радиометрической установки

Радиометрический контроль относится к системам цифровой радиационной дефектоскопии. В этих системах радиационное изображение преобразуется в цифровой массив данных (цифровое изображение), который в процессе проведения контроля может подвергаться различным видам цифровой обработки и в виде полутонового изображения построчно выводиться на монитор ПК.

Радиометрический метод основан на принципе измерения изменения потока гамма- или рентгеновского излучения, прошедшего через материал контролируемого объекта. Детектором для радиометрического контроля является фотодиод с наклеенным на него сцинтиллятором. Под действием излучения сцинтиллятор испускает видимый свет, световой выход сцинтиллятора пропорционален энергии квантов. Это световое излучение вызывает ток в фотодиоде.

Итак, детектор преобразует излучение, проходящее через контролируемое изделие, в электрический сигнал, величина которого пропорциональна интенсивности гамма-излучения.

Приемник рентгеновского излучения представляет собой линейку сцинтилляционных детекторов, каждый из которых оснащен своим усилителем, образуя с ним единый независимый канал. Число детекторов в линейке определяется требуемой шириной зоны контроля. Каждый канал в каждом детекторном блоке последовательно опрашивается, и с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП) полученные сигналы оцифровываются. Блок сбора информации проводит опрос детекторных блоков и передает полученный цифровой массив на ПК.

Перемещая детекторные блоки относительно контролируемого сварного соединения, получаем непрерывно считываемый массив данных. Этот массив записывается в память ПК для последующего более детального исследования и архивирования, а в обработанном виде выводится в виде полутонового изображения на монитор для оперативной оценки качества контролируемого участка в реальном времени.

Требования к рентгеновским аппаратам

Как известно, в радиографическом методе контроля флуктуации интенсивности и энергетического спектра проходящего через объект излучения не влияют на чувствительность контроля, поскольку фиксируемое на рентгеновской пленке изображение определяется интегральной дозой излучения за время экспозиции.

Поэтому при радиографическом контроле можно применять рентгеновские аппараты любых типов. Изготовители рентгеновских аппаратов не приводят данных по флуктуации интенсивности излучения, так как эта величина абсолютно не критична при радиографическом контроле.

Радиометрия — метод измерения в режиме реального времени при построчном сборе информации. Сканирование одной строки занимает десятые доли секунды. Поэтому к рентгеновскому аппарату

предъявляются два основных требования: во-первых, плотность потока излучения, прошедшего через контролируемую толщину объекта, должна быть достаточна велика, чтобы можно было зарегистрировать за это время изменение толщины объекта вдоль участка сканирования на фоне постоянной составляющей прошедшего и рассеянного излучения. Во-вторых, интенсивность излучения в течение сканирования должна быть постоянной. Итак, при радиометрическом контроле требуется применение высокостабильных источников ионизирующего излучения с максимально возможной плотностью потока излучения и постоянным энергетическим спектром.

Для сравнения современных панорамных рентгеновских аппаратов постоянного потенциала был разработан переносной прибор, который обеспечил проведение измерений интенсивности рентгеновского излучения в полевых условиях. С точки зрения применимости этих аппаратов для радиометрического контроля их можно разделить на три группы.

К первой группе относятся аппараты, имеющие фиксированную частоту флуктуации интенсивности рентгеновского излучения. Эти регулярные изменения интенсивности создают поперечные полосы на изображении. Среднеквадратичные отклонения интенсивности при этом в 2—3 раза превышают статистические шумы. Влияние этих флуктуаций можно ослабить программным образом. Для этого радиометрическая установка должна быть оснащена программами, которые будут определять спектральную составляющую флуктуации для каждого применяемого рентгеновского аппарата. Такие аппараты можно считать условно применимыми для радиометрического контроля.

Ко второй группе отнесем рентгеновские аппараты постоянного потенциала, имеющие высокочастотные случайные во времени флуктуации. Величина среднестатистических отклонений интенсивности излучения превышает 1 %. Такие аппараты нельзя применять при радиометрическом контроле.

Идеальным вариантом являются аппараты, у которых стабильность излучения выше 0,5 %, а частота флуктуаций ниже 0,1 Гц. Такие незначительные по величине низкочастотные изменения интенсивности легко устраняются на изображении программно.

Для работы с РМУ был выбран рентгеновский панорамный аппарат РПД-200 П. После определенной модификации системы питания он показал, что может быть успешно применен для проведения радиометрического контроля.

Выбор параметров РМУ

Параметры РМУ определяются прежде всего требованиями к чувствительности и производительности контроля.

Главными элементами установки являются апертура детектора и его размер вдоль направления распространения излучения (лучевая протяженность детектора). При выборе этих размеров необходимо максимально учесть все факторы и возможные условия, при которых будет эксплуатироваться данная РМУ.

К таким факторам относятся:

— диапазон контролируемых толщин;

— требуемая чувствительность контроля;

— критерии отбраковки сварного соединения согласно нормативной документации на радиационный контроль;

— требуемая производительность контроля;

— вид применяемого источника гамма-излучения;

— интенсивность гамма-излучения (радиационная загрузка детектора);

— экономически целесообразная стоимость аппаратуры.

Как известно, чувствительность радиометрического контроля к дефектам — величина регулируемая, зависящая от параметров контроля [1]. В свою очередь, чувствительность контроля определяется соотношением контрастного и пространственного разрешения детектирующего элемента. Контрастная чувствительность определяется квантовой эффективностью детекторов, которая прямо пропорциональна объему сцинтиллятора. Пространственное разрешение обратно пропорционально апертуре детектора. Конструктивные решения и условия сбора информации могут улучшить пространственное разрешение аппаратуры.

Как известно, для контроля сварных соединений на трубопроводах диаметром 1420 мм применяются как рентгеновские аппараты, так и радионуклидные источники ^{192}Ir. При этом требуемая производительность контроля должна быть не менее пяти сварных соединений в 1 ч.

Исходя из этих условий, были выбраны детекторы с лучевой протяженностью 20 мм и апертурой 1,4 × 1,5 мм. Как показали измерения, для ^{192}Ir квантовая эффективность этих детекторов превышает 70 %. Необходимо учесть, что столь значительная величина лучевой протяженности детекторов требует строгой юстировки блока детекторов относительно источника гамма-излучения, что технологически легко достижимо. Оптимальное соотношение между пространственным разрешением и контрастной чувствительностью определяет выбор апертуры детектора. Качество полутонового видео-

изображения должно обеспечивать получение требуемой чувствительности согласно нормативной документации на контроль данного сварного соединения. Это необходимое и достаточное условие правомерности выбора размеров детекторов.

Для проверки чувствительности радиометрического контроля использовались проволочные, канавочные и пластинчатые эталоны качества изображения. Самые объективные оценки пространственного разрешения позволяют получить пластинчатые эталоны с отверстиями. При толщине стенки 20 мм выявляются отверстия *2T* на эталоне № 17 и отверстие *1T* на эталоне № 30. Это соответствует самым жестким требованиям на радиационный контроль. Естественно, изображение проволочных и канавочных эталонов показывало чувствительность, превышающую требуемую.

В случае применения при контроле только рентгеновских аппаратов и при фокусном расстоянии не более 500 мм с любым источником можно применять детекторы с меньшей апертурой и лучевой протяженностью.

Применение линейки детекторов при радиометрическом контроле имеет два существенных недостатка, которые могут привести к ухудшению выявляемости дефектов:

— между элементами в линейке детекторов всегда существует технологический зазор, что уменьшает величину сигнала от объекта в контролируемом участке, часть проекции которого может приходиться на технологический зазор;

— существует вероятность, величина которой зависит от соотношения ширины детектора и величины технологического зазора между детекторами, что сигнал от узкого дефекта типа непровара распределится между двумя соседними детекторами.

При этом условии дефекты с малой шириной и низким контрастом, к которым относятся непровары и трещины в сварном соединении, могут вообще не выявиться на изображении.

Влияние этих факторов можно значительно уменьшить, применяя для радиометрического контроля устройство, оснащенное двумя параллельно ориентированными линейками детекторов, последовательно считывающими информацию с контролируемого участка. При этом линейки смещены относительно друг друга на половину ширины детектора. В этом случае проекция технологического зазора в одной линейке приходится на центр детектора в другой линейке. При работе с двумя детектирующими линейками информация о контролируемом участке содержится как в каждом из двух независимых изображений от каждой линейки, так и в суммарном изображении от обеих линеек. На суммарном изображении возрастает выявляемость и точность измерения дефектов, зарегистрированных обеими линейками, так как отношение сигнал/шум от этих дефектов на суммарном изображении в 1,4 раза больше, чем на изображениях от каждой линейки.

Базовым элементом механизма сканирования для радиометрического контроля сварных соединений при строительстве магистральных газопроводов выбран бандаж, аналогичный применяемому при автоматической сварке. Замыкание бандажа осуществляется натяжной рычажной защелкой. Для обеспечения производительности контроля применяли шесть детекторных блоков, которые одновременно проводят контроль своих сегментов сварного шва. Каждый детекторный блок установлен на своей пассивной каретке на роликах. Ролики выполнены на шарикоподшипниках и опираются на бандаж.

Перемещение приводной каретки с мотор-редуктором по образующей трубы и бандажу на длину 1/6 периметра (с учетом перекрытия смежных участков) осуществляется звездочкой и цепью Галля, закрепленной на бандаже. Натяжение цепи и исключение самопроизвольного перемещения достигаются талрепом и двумя подпружиненными натяжителями цепи, установленными на приводящей каретке. Синхронное перемещение детекторных блоков обеспечивается металлическими шарнирами с рычагами, связывающими каретки между собой. После завершения контроля очередного сварного соединения бандаж с закрепленными на нем детекторными блоками перемещается к следующему шву с помощью транспортной тележки. Транспортная тележка перемещается по контролируемому трубопроводу. На ней можно располагать источники питания и необходимую аппаратуру.

Программное обеспечение радиометрической установки состоит из четырех основных блоков — программы сбора информации, программы улучшения изображения, программы управления блоками и аппаратурой в целом и программы автоконтроля.

Проведение радиометрического контроля

Отработку методики радиометрического контроля, отладку и согласование блоков и узлов аппаратуры проводили в рентгеновской камере на катушке диаметром 1420 мм с двумя сварными соединениями (сварка покрытым электродом, автоматическая сварка под флюсом). При проведении измерений применяли радиоактивный источник ^{192}Ir активностью от 40 до 65 Ки и различные рентгеновские аппараты. Все источники излучения при проведении измерений располагались

в центре катушки, т. е. фокусное расстояние составляло 760 мм.

Предельную чувствительность радиометрического контроля измеряли с применением рентгеновского аппарата направленного действия ERESCO65 MF2 при 225 кВ и анодном токе 3,8 мА. Считывание информации проводилось одним детекторным блоком с учетом диаграммы направленности рентгеновского излучения. Скорость сканирования детекторных блоков при проведении измерений выбиралась от 2,2 до 3 мм/с. Чувствительность контроля составляла 0,3 мм по канавочному эталону № 1, 0,25 мм — по проволочному, на пластинчатом с отверстиями ASTM № 17 выявлено отверстие *2T*, на ASTM № 30 — *1T*.

Контроль сварных соединений на катушке диаметром 1420 мм проводили с применением панорамного рентгеновского аппарата РПД-200 П с модифицированным источником питания. Параметры излучения — 190 кВ, анодный ток — 4,8 мА. Так как интенсивность рентгеновского излучения аппарата РПД-200 П в выбранном режиме в 2 раза ниже, чем от аппарата ERESCO, то отношение сигнал/шум в 1,5 раза ниже, следовательно, и чувствительность контроля ниже.

Радиометрическую установку испытывали в полевых условиях при контроле поворотных стыков трубопровода при температуре окружающей среды от –30 до 0 °С с дождем и мокрым снегом. РМУ и РПД-200 П продемонстрировали свою работоспособность в этих условиях. Были, конечно, и сбои в работе аппаратуры по зависящим и не зависящим от авторов статьи причинам. Замечания по работе аппаратуры были учтены, отработана технология радиометрического контроля поворотных сварных соединений при строительстве газопроводов.

Сварной шов, выполненный автоматической сваркой под флюсом, имеет выпуклость над основным металлом 6—8 мм, а с учетом выпуклости внутренней подварки толщина в районе корня шва превышает толщину стенки трубы на 10 мм. При радиационном контроле сварных соединений переменного сечения с большим перепадом просвечиваемых толщин на контролируемых участках (тонкостенных сварных соединений с относительно большой выпуклостью шва, швов приварки патрубков, различных тавровых соединений и т. д.) оценка качества сварного соединения затруднена из-за значительного контраста изображения контролируемого участка.

При радиометрическом контроле большинства сварных соединений с переменной толщиной значительное изменение толщины поглотителя распределяется вдоль ориентации линейки детекторов, а в направлении сканирования изменения толщины под каждым элементом шейки детекторов незначительны. Это позволяет определить среднюю толщину поглотителя — "усредненный профиль", зарегистрированную каждым детектором, усредняя текущие значения выходных сигналов в данном канале.

Для уменьшения диапазона градаций серого в получаемом изображении участка с переменной толщиной поглотителя достаточно из текущих значений сигналов, полученных в процессе контроля сварного соединения, вычесть значения "усредненного профиля" в каждом канале. Применение вычитания "усредненного профиля" приводит к тому, что резко повышается выявляемость дефектов в сварном соединении, а изображение сварного шва с выпуклостью и ОШЗ лежат практически в одном и том же диапазоне градаций серого. Необходимо учесть, что вычитание "усредненного профиля" может привести к исчезновению на изображении протяженного непровара. Но его изображение всегда присутствует в необработанном массиве данных, в который не вносятся изменения, вызванные последующей обработкой изображения.

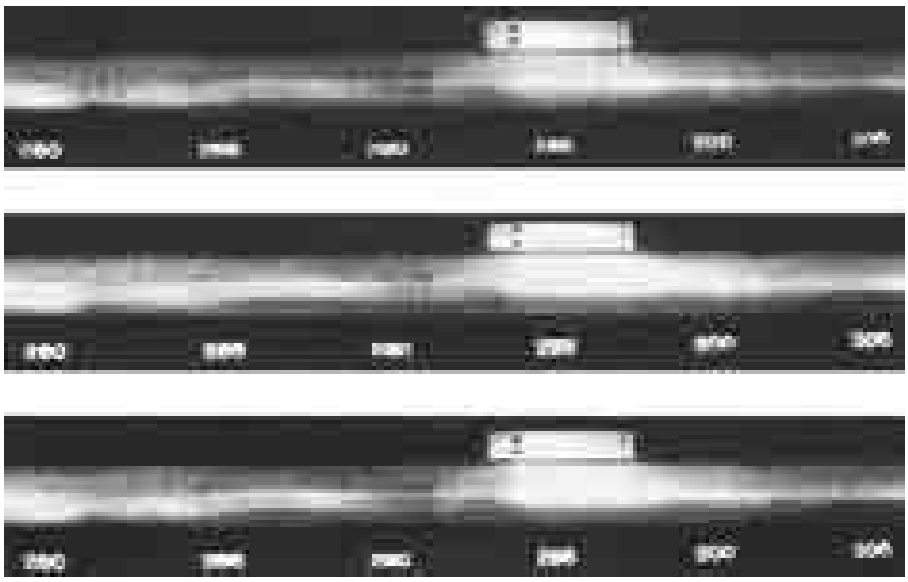


Рис. 1. Автоматическая сварка. РПД-200 П — 190 кВ, 4,8 мА. Сверху — два изображения, полученные от каждой линейки детекторов в блоке, внизу — суммарное изображение этих двух линеек

На рис. 1 показано, в каком виде выводится на мониторе ПК изображение сварного шва (ав-

томатическая сварка) в реальном времени при радиометрическом контроле. Сверху располагаются изображения от двух линеек детекторов в блоке, которые последовательно считывают информацию с контролируемого участка. Нижняя часть изображения — выполненное программным образом суммарное изображение от этих двух линеек. На рис. 2 приводится результат от действия вычитания "усредненного профиля" на том же участке сварного соединения. Естественно, чем меньше продольные колебания толщины усиления, тем выше эффективность применения этого метода.

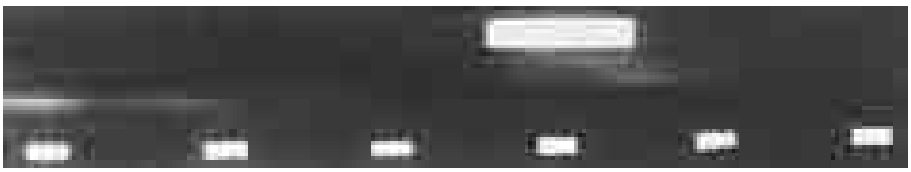


Рис. 2. Результат от действия вычитания "усредненного профиля" на том же участке сварного соединения

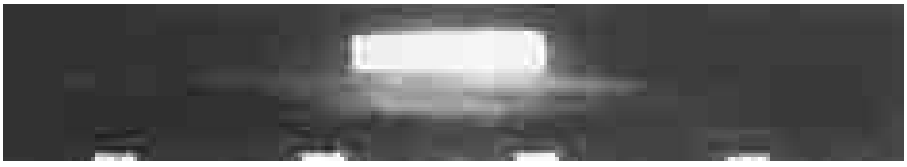


Рис. 3. Сварное соединение, выполненное ручной сваркой

Рис. 4. Контроль сварного соединения с применением ^{192}Ir. Активность ^{192}Ir — 80 Ки. Скорость сканирования — 8,7 м/ч. Изображение после вычитания "усредненного профиля"

На рис. 3 изображено сварное соединение, выполненное ручной сваркой. Анализ изображения такого шва показал необходимость разработки программного обеспечения по подавлению пространственных шумов, обусловленных неравномерностью поверхности сварного соединения. Наличие сопутствующего сигнала значительно ухудшает выявляемость дефектов как при оценке качества оператором (как и на рентгеновской пленке), так в еще большей степени при автоматизации обнаружения дефектов с помощью программного обеспечения. Поэтому поверхность сварного соединения с грубой чешуей должна быть зачищена с использованием средств механической обработки до начала проведения радиометрического контроля. При контроле швов с ручной сваркой метод вычитания "усредненного профиля" дает положительный эффект, но в меньшей степени, чем при контроле швов, сваренных автоматом.

На рис. 4 приведено изображение, полученное при контроле ручного сварного соединения с применением радионуклидного источника ^{192}Ir. Предварительные расчеты показали, что при радиометрическом контроле трубопроводов диметром 1420 мм для обеспечения производительности контроля 6 мин на шов активность ^{192}Ir должна быть не меньше 60 Ки. В нашем распоряжении был источник с начальной активностью 65 Ки. Чувствительность контроля без снижения скорости сканирования по канавочному эталону выполнялась вплоть до активности 45 Ки. При более низкой активности необходимо уменьшать скорость контроля.

Анализ результатов радиометрического контроля

Выявляемость дефектов в сварных соединениях при радиометрическом контроле определялась сравнением с радиографическим изображением. По рентгеновскому снимку определялся размер выявленных в сварном соединении дефектов. Чувствительность контроля и, как следствие, выявляемость дефектов при радиометрии уменьшается по мере уменьшения радиационной загрузки детекторов и увеличения энергии гамма-излучения. Наилучшие результаты получены при использовании аппарата ERE3C065 MF2 при 225 кВ и анодном токе 3,8 мА (с прямым пучком), наихудшие — при применении ^{192}Ir.

Основной объем работы проводился с использованием аппарата РПД-200 П. Получена полная воспроизводимость по выявляемости дефектов, конечно, в пределах статистической погрешности. Выявляемость пор размером 0,7 мм составляла 90 % при работе с ERESCO, 70 % — при работе с РПД-200 П и не более 20 % — при использовании ^{192}Ir. Все дефекты размером больше чем 1,2 мм были выявлены во всех случаях. Поэтому можно утверждать, что, несмотря на то, что активность ^{192}Ir была низкой, аппаратура обеспечила требования

чувствительности контроля при времени сканирования 6 мин.

Все сказанное выше относится к контролю швов, сваренных в автоматическом режиме. Измерения показали, что радиометрическому контролю можно также подвергать швы, выполненные ручной сваркой. Но перед проведением контроля такие швы должны обязательно зачищаться в соответствии с нормативной документацией. Даже на рентгеновском снимке иногда невозможно отличить шлаковое включение от резкой впадины между грубыми чешуйками сварки.

Конечно, принятые в данной установке размеры детектора не оптимальны для контроля толщин около 20 мм, но только такие детекторы позволяют проводить контроль с использованием ^{192}Ir. Эксперименты на плоских образцах сварных соединений различной толщины показали, что такой размер детекторов является оптимальным для радиометрического контроля сварных соединений толщиной от 30 до 100 мм как с применением рентгеновского излучения, так и с использованием радионуклидных источников. При контроле толщин от 45 мм и выше пространственное разрешение радиометрического изображения близко к пространственному разрешению радиографии, а коэффициент накопления рассеянного излучения при радиометрии значительно меньше, чем при радиографии при тех же условиях просвечивания. При размерах апертуры 1,4 × 1,5 мм разрешение изображения в направлении сканирования составляет 0,4 мм, поперек движения — 1,7 мм, а с учетом применения двух параллельных линеек детекторов — около 1 мм. Применяя технологические и программные решения, можно достичь размера пикселя 0,4 × 0,7 мм.

При радиационном контроле сварных соединений пространственное разрешение детектирующего устройства должно обеспечить более точное определение формы и размеров выявленных дефектов, разделить близко лежащие дефекты. Но прежде всего эти дефекты должны быть выявлены. Выявляемость дефектов в первую очередь зависит от контрастной чувствительности детектирующего устройства. В свою очередь, контрастная чувствительность метода определяется эффективностью и линейностью регистрации гамма-излучения, динамическим диапазоном детектирующего устройства [2, 3]. По всем этим параметрам РМУ значительно превосходит все остальные методы радиационной дефектоскопии во всем диапазоне энергий гамма-излучения. С учетом того, что дефектоскопическая чувствительность радиометрического контроля — величина регулируемая, радиометрический контроль — универсальный метод в широком диапазоне толщин исследуемых материалов и энергий гамма-излучения.

ВЫВОДЫ

Радиометрический контроль имеет наихудшее пространственное разрешение по сравнению с другими радиационными методами, однако этот недостаток может быть скомпенсирован наивысшей контрастной чувствительностью. Это обеспечивает выявление и измерение недопустимых дефектов в контролируемых изделиях. При радиометрическом контроле могут применяться как рентгеновские аппараты, так и радионуклидные источники. Для обеспечения радиометрического контроля в диапазоне толщин от 10 до 200 мм достаточно применение 3—4 типоразмеров детектора.

Радиометрический контроль может широко применяться для исследования большого объема однотипных изделий, он обеспечивает высокую производительность, оперативность и степень автоматизации. Этот метод может применяться при строительстве магистральных газо- и нефтепроводов, на трубных заводах, при изготовлении цистерн для агрессивных сред, на машиностроительных заводах, в авиа- и ракетостроение и т. д. По данным статистики, в толстостенных сварных соединениях до 70 % дефектов располагаются в корне шва. Как правило, толстостенное изделие, на котором заварен только корень шва, нельзя передать на рентгеновскую камеру для технологического контроля. С помощью радиометрической установки можно проводить контроль корня шва прямо на сварочном стенде, не отключая обогрев свариваемого соединения.

Стремительно развивающаяся электронная и вычислительная техника открывают широкие возможности для усовершенствования и удешевления радиометрической аппаратуры.

Измерения, проведенные с помощью панорамного рентгеновского аппарата РПД-200 П, показали, что на базе рентгеновских аппаратов этого типа могут быть созданы радиометрические комплексы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лебедев В. А., Сонин Г. И.* Область применения радиометрических установок // В мире НК. 2002. № 1 (15). С. 24—27.
2. *Неразрушающий* контроль и диагностика: Справочник / Под ред. В. В. Клюева. М.: Машиностроение, 1995.
3. *Зуев В. М., Табакман Р. Л., Удралов Ю. И.* Радиографический контроль сварных соединений. СПб.: Энергоатомиздат, 2001.

"В мире неразрушающего контроля", 2006, № 4

Д. Б. КАЛАШНИКОВ, аспирант
Филиал Южно-Уральского государственного университета (Златоуст)

Автоматизация расчета на прочность зубьев плоскоколесных передач с применением метода конечных элементов

Введение

Плоскоколесная зубчатая передача является частным случаем цилиндроконической передачи, когда угол между пересекающимися осями колес равен 90°. В этом случае коническое колесо вырождается в плоское колесо. Плоскоколесную передачу называют также ортогональной цилиндроконической зубчатой передачей [1, 2]. Достоинством таких передач являются прежде всего их широкие компоновочные возможности, благодаря которым их применяют в трансмиссиях вертолетов, приводах и цепях обкатки станков, механизмах приборов, дифференциалах автомобилей и др. Одним из основных преимуществ плоскоколесных передач является возможность получения таких компоновочных схем приводов, которые не могут быть реализованы с помощью традиционных передач. Плоскоколесные зубчатые передачи с успехом применяют в легкой промышленности, станкостроении, авиационной технике.

На рис. 1 приведена плоскоколесная передача электроперфоратора, а на рис. 2 — привод несущего винта вертолета.

Однако прочностные возможности таких передач исследованы недостаточно, что сдерживает их дальнейшее применение. В связи с этим разработка новых и совершенствование существующих методов исследования прочностных возможностей плоскоколесных передач являются актуальными задачами, решение которых способствует значительному расширению области применения данных передач.

Методика автоматизированного расчета на прочность

Поверхность зуба плоского колеса имеет сложную форму (рис. 3) [1], поэтому известные методы, применяемые для расчета на прочность цилиндроконических зубчатых передач, в данном случае не применимы.

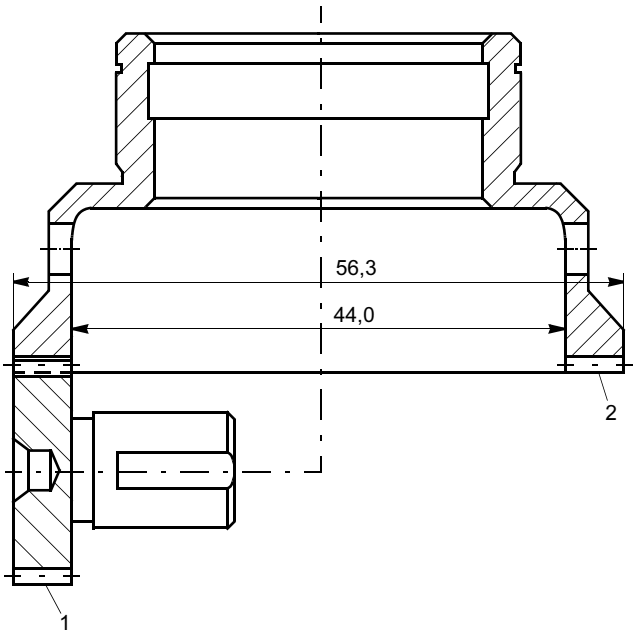


Рис. 1. Плоскоколесная передача электроперфоратора: *1* — эвольвентная шестерня; *2* — плоское неэвольвентное колесо

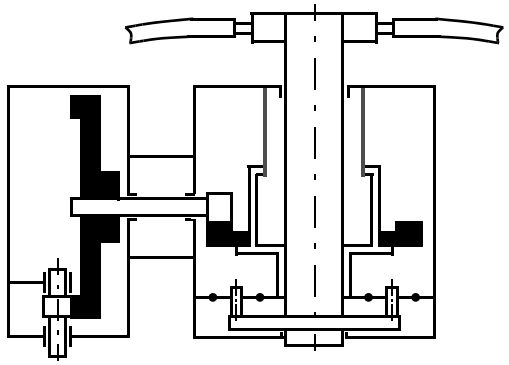


Рис. 2. Привод несущего винта вертолета

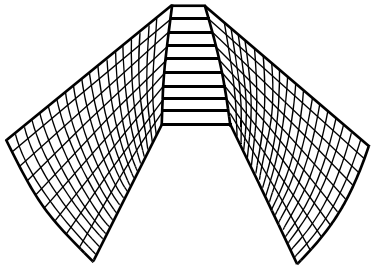


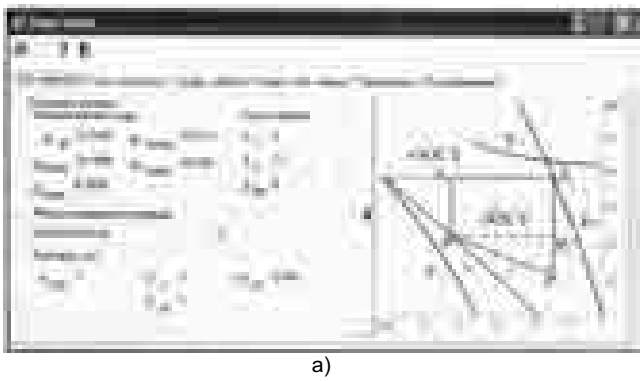
Рис. 3. Форма поверхности зуба плоского колеса

Автоматизация расчета на прочность зубьев плоскоколесных передач сводится к компьютерному моделированию напряженно-деформированного состояния (НДС) зубьев методом конечных элементов. Для анализа НДС зубьев плоского колеса используют его трехмерную компьютерную модель.

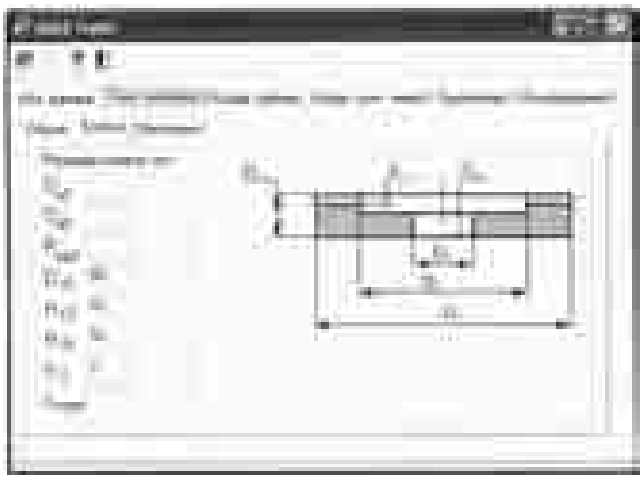
Задачами компьютерного моделирования НДС являются:

— получение твердотельной компьютерной модели зуба плоского колеса после расчета зацепления и нахождения рациональной части области существования зацепления;

Рис. 4. Компьютерная модель неэвольвентного плоского колеса



а)



б)

Рис. 5. Главное окно компьютерной программы

— получение расчетной схемы для проведения анализа (метод анализа, определение граничных условий, наложение зависимостей, приложение нагрузки);

— проведение анализа НДС и определение деформаций, напряжений, мест с опасной концентрацией напряжений;

— выработка рекомендаций по оптимизации формы поверхности зубьев колеса.

Построение компьютерной модели зуба производится после синтеза зацепления в обобщающих параметрах [1—3]. Полученные на этапе синтеза значения обобщающих параметров зацепления и геометрических размеров колес используют в качестве исходных данных при расчете твердотельной модели зуба. Компьютерная модель неэвольвентного плоского колеса приведена на рис. 4.

Для расчета и построения трехмерной модели зуба плоского колеса разработана компьютерная программа Solid Teeth[1]. Главное окно программы приведено на рис. 5.

После ввода исходных данных строится модель зуба с использованием концепции COM (COM — Component Object Model, модель компонентных объектов). Технология COM, разработанная фирмой Microsoft, позволяет связывать между собой различные приложения. Программное обеспечение, построенное с использованием данной технологии, предоставляет описание своих компонентов и средств доступа к ним другим программам. Это позволяет одним приложениям (приложениям-клиентам) использовать функции других приложений (приложений-серверов). В качестве COM-сервера выбрана объектная модель AutoCAD [4]. Особенностью программы является то, что расчет координат точек поверхности зуба плоского колеса и заполнение массива выполняется средствами языка Object-Pascal, реализованного в среде разработки Delphi, а построение самой модели зуба в среде AutoCAD производится при помощи команд AutoCAD. Доступ к структуре объектов AutoCAD из-под среды разработки Delphi осуществляется посредством импорта библиотеки типов acax16enu.tlb.

Результаты расчета на прочность

После того как в AutoCAD построена твердотельная модель зубьев колес передачи с использованием формата IGS происходит экспорт данной модели в универсальную конечно-элементную CAD-систему. Наиболее известными представителями конечно-элементных программных продуктов являются COSMOSWorks, ANSYS, NASTRAN. Для решения

[1] Свидетельство об отраслевой регистрации разработки № 7351 от 8 декабря 2006 г.

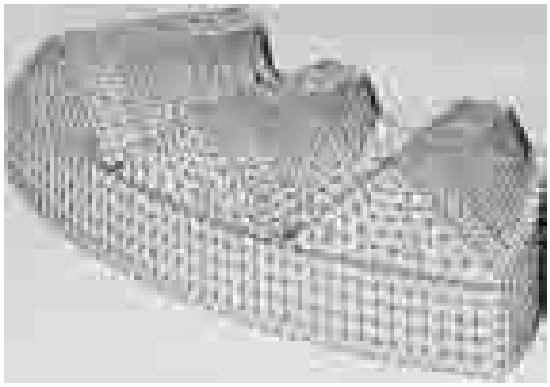


Рис. 6. Конечно-элементная сетка

Рис. 7. Эпюра эквивалентных напряжений по Мизесу

исследовательских задач используют программную систему ABAQUS [5].

Концепция предложенного метода базируется на следующих основных положениях:

— с целью уменьшения размерности задачи, используя принцип симметрии, расчету на прочность подвергается твердотельная модель, состоящая из трех зубьев (рис. 6);

— распределение нагрузки в зоне контакта не учитывается. Расчет контактных и изгибных напряжений осуществляется на основании алгоритма универсальной компьютерной программы — конечно-элементной системы, используя величину момента, приложенного к шестерне, либо величину нормальной силы, приложенной к зубу колеса;

— проектирование конечно-элементной модели осуществляется автоматически, используя уравнения зубчатых поверхностей и учитывая соответствующие переходные и кромочные участки.

Проведен анализ НДС плоского колеса со следующими параметрами: число зубьев 22, внутренний диаметр 55,3 мм, наружный диаметр 79,5 мм, модуль 2,3 мм. Материал — сталь плотностью 7850 кг/м^3, модуль Юнга $2{,}14 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона 0,29. Нормальная сила в зацеплении 100 Н. Характеристики конечно-элементной модели: общее число элементов — 52 405, число узлов — 76 469. На рис. 6 приведена конечно-элементная сетка, а на рис. 7 — эпюра напряжений по Мизесу.

Результаты расчета на прочность зубьев плоского колеса: главные напряжения $\sigma_1 = 6{,}43 \cdot 10^6$ Па, $\sigma_2 = 1{,}7 \cdot 10^6$ Па, $\sigma_3 = 9{,}133 \cdot 10^5$ Па, максимальная деформация $2{,}225 \cdot 10^{-7}$ м.

Видно (см. рис. 7), что максимальные эквивалентные напряжения находятся у основания зуба на переходной кривой.

С использованием результатов анализа НДС зубьев плоского колеса даются рекомендации по оптимизации формы переходной кривой, наиболее полно определяются условия эксплуатации передачи. В большинстве случаев наиболее нагруженными будут зубья цилиндрической шестерни, расчет на прочность которой выполняется по известной методике для эвольвентных цилиндрических колес. Можно составить расчетную схему из двух колес передачи. Для уменьшения размерности задачи рационально использовать не все зубья колес, а оставить для расчета на прочность по три зуба у каждого из колес передачи. В этом случае определяются не только эквивалентные, но и контактные напряжения. Такая расчетная схема позволит выполнять полностью автоматизированный комплексный расчет на прочность плоскоколесных зубчатых передач в наиболее удобной для пользователя конечно-элементной программной системе.

Заключение

Автоматизация расчета на прочность зубьев плоскоколесных передач позволяет значительно снизить трудоемкость их прочностного расчета, повысить скорость и качество проектирования данного вида передач. Кроме того, использование формата AutoCAD предоставляет широкие возможности по графической обработке трехмерной модели зуба, а также возможность экспорта в другие приложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Лопатин Б. А., Цуканов О. Н.* Цилиндро-конические зубчатые передачи. Челябинск: ЮУрГУ, 2005. 200 с.
2. *Цуканов О. Н., Лопатин Б. А., Калашников Д. Б.* Проектирование ортогональных цилиндро-конических зубчатых передач в обобщающих параметрах // Теория и практика зубчатых передач. Ижевск: ИжГТУ, 2004.
3. *Калашников Д. Б.* Объектная модель AutoCAD в проектировании плоскоколесных зубчатых передач // Информационные технологии и математическое моделирование. Ч. 1. Томск: Томский государственный университет, 2006. С. 49—53.
4. *Полещук Н. Н.* AutoCAD 2004: разработка приложений и адаптация. С.-Петербург: БХВ-Петербург, 2004. 624 с.
5. *Проектирование*, формообразование и анализ напряженного состояния двух разновидностей плоскоколесных передач / Ф. Л. Литвин, А. Фуэтнеси, К. Занзи, М. Понтиджиа // Передачи и трансмиссии. 2004. № 1. С. 102—118.

А. А. РЫБАКОВ, инж.

Унифицированный энергомодуль бесперебойного электроснабжения

При высокой степени электрификации всех сфер человеческой деятельности существующие проблемы, связанные с качеством и количеством электроэнергии, перебоями и плановыми отключениями энергоснабжения, различными авариями, "провалами" напряжения, вызываемыми резким увеличением нагрузки, — все это нередко приводит к потерям в экономике и обыденной жизни потребителей. В статье Д. Занятнова "Электричество всегда и везде" сообщается, что фирма "Микро-Арт" выпускает многофункциональный преобразователь напряжения для резервного питания МАП "Энергия", объединенный с аккумулятором и обладающий высоким уровнем мощности при умеренной цене. Устройство представляет двунаправленный инвертор со встроенным интеллектуальным микроконтроллером, обеспечивающим автоматическое управление режимами и при необходимости связь с компьютером. Прибор сам следит за наличием в сети напряжения и при необходимости подзаряжает аккумулятор. В случае исчезновения напряжения автоматически и мгновенно подменяет его напряжением, генерируемым от энергии, накопленной в аккумуляторе. При появлении напряжения в сети прибор переходит в дежурное состояние, при этом потребление энергии практически равно нулю. Повышается качество энергии, прибор ослабляет шумы и "срезает" высоковольтные импульсы в сетевом напряжении. Прибор можно использовать в полевых условиях для выполнения различных работ за счет накопленной в аккумуляторе энергии.

Прибор, безусловно, полезен и в определенных ситуациях просто незаменим. Очевидно, что его возможности значительно расширятся, если аккумулятор частично или полностью заменить микроэлектростанцией, преобразующей химическую энергию моторного топлива в электроэнергию. Существующие дизель- и бензоагрегаты мало подходят на эту роль. Они громоздки, дороги, вырабатываемая ими энергия также дорога, работают только на определенных сортах топлив, требуют квалифицированного обслуживания.

Предположим, имеется компактный, относительно легкий, с высокой удельной мощностью энергомодуль номинальной мощностью в несколько киловатт, работающий на всех сортах моторных топлив, жидких, газообразных. Имея все признаки унифицированного агрегата, энергомодуль может использоваться на специализированных транспортных средствах в качестве вспомогательного источника энергии. Продолжительность его работы ничем не ограничена. Особо важная роль энергомодулю отводится при решении задач МЧС в экстремальных условиях, когда жизненно необходимо срочное энергоснабжение. В очень короткие сроки и без особых проблем унифицированные энергомодули будут доставляться в любые географические точки и на местах путем объединения в группы комплектоваться миниэлектростанции значительной мощности, способные обеспечивать энергией не только отдельные объекты, но даже крупные поселки. Трудно перечислить все сферы применения энергомодуля. Но существует еще одна область, где они займут лидирующее положение, — автомобильное моторостроение.

Автомобили с гибридной силовой установкой уже перестали быть экзотикой, выпускаются несколькими фирмами крупными сериями и имеют повышенный спрос, так как отличаются высокой экономичностью (несколько литров топлива на 100 км при относительно большой массе) и предельно высокой экологичностью — практически нулевым выбросом вредных веществ — качеством, трудно переоценимым в эпоху тотальных пробок в городах. Из существующих принципиальных схем комбинированных силовых установок наиболее перспективна схема электромобиля с собственной зарядной станцией. Электростанция — двигатель внутреннего сгорания (ДВС), сблокированный с электрогенератором, заблаговременно заряжает аккумулятор. При ускоренном старте автоматически запускается электростанция и ее энергия совместно с энергией от аккумулятора подается на электромоторы привода колес. Отсюда высокие динамические показатели автомобиля. На промежуточных скоростях, не достигающих максимальной, периодически запускается электростанция и подзаряжает аккумулятор. Режим работы ДВС оптимальный (максимальные кпд и экологичность), коэффициент загрузки ДВС во всем диапазоне скоростей равен единице. И только на максимальной скорости, когда аккумулятор уже разряжен, ДВС работает непрерывно. Во время

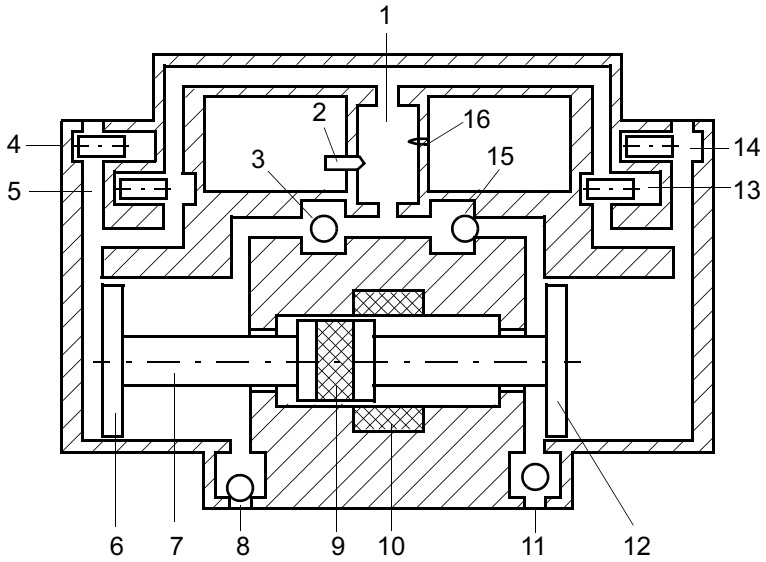
торможения электромоторы привода колес, действуя в режиме генераторов, направляют вырабатываемую энергию в аккумулятор, способствуя экономичности силовой установки. Недостатки такой схемы: энергия на периодические запуски ДВС теряется безвозвратно, на максимальной скорости работает только ДВС, так как аккумулятор к этому времени уже разряжен, т. е. удельная мощность силовой установки несколько ниже таковой с традиционной механической передачей крутящего момента на колеса.

Оба недостатка устраняются, если ДВС комбинированной силовой установки заменить группой унифицированных энергомодулей, а емкость аккумулятора уменьшить настолько, чтобы принимать только энергию рекуперации торможения. В результате получится силовая установка со свойственными только ей характеристиками. Время выхода энергомодуля на максимальный режим мощности и затрачиваемая на это энергия пренебрежимо малы. При ускоренном старте вся группа энергомодулей включается одновременно. После того как автомобиль наберет выбранную скорость, часть энергомодулей выключается, в работе остаются только те из них, которые обеспечивают эту скорость. Для сообщения максимальной скорости снова включается вся группа энергомодулей. Расход топлива прямо пропорционален развиваемой мощности. Холостого хода как такового нет, кпд во всем диапазоне нагрузок постоянен и максимален, чем обеспечивается максимальная экономичность. В процессе эксплуатации износ каждого энергомодуля индивидуален: энергомодули задействованы одновременно далеко не всегда. Замена выработавших ресурс энергомодулей гарантирует бесконечность ресурса силовой установки в целом. Энергомодуль имеет все признаки расходуемого материала. В случае выхода из строя во время движения одного энергомодуля пропорционально снижается динамичность автомобиля. Даже если неисправными окажутся все энергомодули, за исключением одного, автомобиль не лишается подвижности полностью. Если для непрерывного движения энергетических возможностей оставшихся работоспособными энергомодулей, и даже одного, окажется недостаточно, энергомодули заряжают аккумулятор и затем энергия от энергомодулей и аккумулятора подается на привод колес, преодолевается участок пути, после чего цикл повторяется. Из этого следует уникальная живучесть силовой установки, свойственная только полисистемам. Замена дефектного энергомодуля не сложнее замены колеса.

Но основное достоинство многомодульной энергосистемы в другом. По прогнозам аналитиков, в 2010 г. в мире будет произведено около 100 млн автомобилей всех назначений. На каждый в среднем потребуется несколько энергомодулей. Исходя из этого, можно приблизительно определить объем производства в год. С учетом всех областей применения унифицированных энергомодулей счет идет на миллиарды. Автоматизированное производство энергомодулей в таких объемах сведет затраты человеческого труда к минимуму и снизит их стоимость в пересчете на единицу мощности ниже стоимости самого дешевого ДВС, тем более что сложность конструкции и требования к материалам для их производства останутся на том же уровне. Утверждение — в автомобиле все, что не видно, должно быть одинаковым — найдет буквальное воплощение. Осталось подтвердить реальность создания унифицированного энергомодуля с удельной мощностью, превышающей несколько ватт на грамм массы, на примере описания принципа действия одного из его вариантов.

Принцип действия унифицированного энергомодуля в составе однотактного свободнопоршневого двигателя с внешней камерой сгорания и линейного электрогенератора

При пуске энергомодуля в камеру сгорания *1* (см. рисунок) форсункой *2* подается топливо и



Унифицированный энергомодуль в составе однотактного свободнопоршневого двигателя с вынесенной камерой сгорания и линейного электрогенератора

воспламеняется свечой зажигания *16*. Продукты сгорания через открытый клапан *5* поступают в левую полость поршня *6* и под их воздействием поршень и соединенные с ним штоком *7* якорь *9* и поршень *12* начинают движение слева направо. Площадь левой торцовой поверхности поршня больше площади его противоположной поверхности на величину площади поперечного сечения штока. Следовательно, давление воздуха в правой полости поршня больше давления продуктов сгорания в его левой полости, поэтому воздух из правой полости поршня открывает клапан *3* и поступает в камеру сгорания, обеспечивая кислородом процесс горения топлива. Одновременно воздух из правой полости поршня *12* через открытый клапан *14* выбрасывается в атмосферу (при последующих рабочих циклах — отработавшие газы), воздух из атмосферы через открытый клапан *11* поступает в его левую полость. Магнитный поток движущегося якоря *9* пересекает витки статорной катушки *10*, в результате в последней генерируется импульс электроэнергии. По достижении поршнями крайнего правого положения система управления (на рисунке не показана) переводит газораспределительные клапаны *4*, *5*, *14* в противоположное положение. Продукты сгорания из камеры сгорания через открывшийся клапан *13* поступают в правую полость поршня *12*, поршни *6* и якорь начинают движение справа налево. Воздух из левой полости поршня *12* закрывает клапан *11* и через открывшийся клапан *15* поступает в камеру сгорания. Клапан *3* закрывается, воздух из атмосферы через открывшийся клапан *8* засасывается в правую полость поршня *6*, а отработавшие газы через открывшийся клапан выбрасываются в атмосферу. Магнитный поток якоря пересекает витки статорной катушки, и в ней генерируется импульс электроэнергии противоположного знака. В дальнейшем система управления, переводя газораспределительные клапаны из одного положения в противоположное, обеспечивает постоянную подачу воздуха в камеру сгорания. Якорь совершает колебательные движения, в статорной катушке генерируется переменное напряжение. Пульсации давления подаваемого в камеру сгорания воздуха сглаживаются воздушным ресивером (на рисунке не показан). Возникающая в результате реакции движения поршней вибрация компенсируется применением двух энергомодулей, ориентированных так, что оси симметрии поршней и якоря располагаются на одной прямой, а их движение тем или иным способом организуется в противофазе.

Преимущества унифицированного энергомодуля по сравнению с агрегатом питания на основе ДВС с кривошипно-шатунным механизмом и электрогенератора с вращающимся ротором

В отличие от ДВС с кривошипно-шатунным механизмом в расширительной машине энергомодуля отсутствуют такие массивные детали, как поршневые пальцы, шатуны, коленвал, маховик и их подшипники, картер. В линейном генераторе нет оси якоря и ее подшипников. Это означает, что при одной и той же мощности масса энергомодуля меньше на суммарную массу перечисленных деталей электроагрегата на основе ДВС. Уже один этот факт существенно влияет на удельную мощность. В четырехтактном ДВС поршень выполняет функции насоса и рабочего поршня. На один рабочий цикл приходится четыре такта, четыре хода поршня. В свободнопоршневой расширительной машине с внешней камерой сгорания рабочий цикл совершается за один ход поршней. При одной и той же средней скорости поршней и частоте движения поршней выигрыш в рабочей частоте четырехкратный. По сути, свободнопоршневая машина с внешней камерой сгорания представляет собой новый однотактный двигатель. Известно, что удельная мощность машины дискретного действия прямо пропорциональна частоте рабочих циклов, которая зависит от нескольких факторов, в том числе от массы подвижных деталей. А их массу можно уменьшить, уменьшив мощность двигателя, например, до нескольких киловатт, что соответствует требованиям массового потребителя. За один рабочий цикл расширительной машины энергомодуля генерируется один импульс электроэнергии. Если этот импульс путем размыкания цепи статорной катушки или катушки якоря разделить на два или несколько отдельных импульсов, то генерируемая частота будет равна произведению частоты рабочих циклов машины на число разделенных импульсов. Возрастет удельная мощность генератора, а следовательно, и удельная мощность энергомодуля в целом. Необходимо отметить, что существует необоснованное предубеждение в отношении линейных генераторов: якобы их удельная мощность кратно ниже мощности генераторов с вращающимся ротором. С точки зрения закона сохранения энергии вращательное и возвратно-колебательное движение материального тела — крайние вырождения одного движения в другое. Частота рабочих циклов определяется средней скоростью поршня, которая зависит от скорости поступления продуктов сгорания в цилиндр, а последняя, в свою очередь, зависит от эффективной пропускной способности клапана, от значения так называемого параметра "вре-

мя—сечение". Чем больше площадь клапана, тем выше его пропускная способность. Разрабатывается клапан с приводом непосредственно энергией рабочего тела машины. Площадь его сечения может достигать площади поперечного сечения цилиндра машины, а отсутствие механического привода значительно снижает удельную массу клапана и потери энергии на его привод, достигающие в традиционном ДВС 4 %.

Состояние современного материаловедения позволяет получить камеру сгорания из жаропрочных материалов, выдерживающих температуру сгорания топлива при стехиометрическом соотношении топливо — окислитель, в процессе которого топливо сгорает до конечных продуктов окисления, не оставляя кислорода для образования оксидов азота. Высокотемпературное охлаждение, охлаждение воздухом существенно повышают кпд машины. Воздух из атмосферы после компрессора, перед тем как поступить в камеры сгорания, обтекает поверхности выхлопного коллектора, цилиндров и камеры сгорания, отбирает от их стенок теплоту и снова направляет ее в камеру сгорания. Потери на охлаждение сводятся к минимуму. По сути, это не столько охлаждение, сколько рекуперация неиспользованной в начальной фазе рабочего процесса тепловой энергии продуктов сгорания. Есть еще один факт в пользу свободнопоршневой машины: в классическом ДВС вследствие воздействия шатуна на поршень присутствует сила бокового давления поршня на цилиндр, максимальная в середине пути поршня между крайними точками движения. Трение поршня о стенку цилиндра поглощает значительную долю индикаторной мощности двигателя, вызывает усиленный износ трущейся пары, снижает экологичность. В свободнопоршневой машине отсутствуют силы бокового давления поршня на цилиндр и связанные с ними потери. Колебания давления продуктов сгорания на всем протяжении тракта не вызывают ударных нагрузок, поэтому перспектива создания "керамического" двигателя вполне реальна. Композит керамики с графитом обладает высокими температурным градиентом, износоустойчивостью, низким коэффициентом трения, что позволяет частично или полностью отказаться от смазки.

И, наконец, следует отметить многотопливность, обусловленную непрерывным процессом горения, нетребовательным к физико-химическим характеристикам топлива.

Таким образом, энергомодуль мощностью в несколько киловатт и массой, позволяющей переносить его вручную, необходим, никаких принципиальных препятствий, кроме проблемы инвестирования, для его создания нет.

Н. И. КОЗЛОВ, инж., А. П. СЕМЕНОВ, канд. техн. наук,
В. В. РЯБОВ, д-р техн. наук, Г. В. ШУЛЬЖЕНКО, канд. техн. наук
ОАО "Завод "Измеритель" (С.-Петербург)

Современные приборы контроля герметичности отечественного производства

Работа высокотехнологичных отраслей, таких как нефте- и газодобыча, космическая отрасль, цветная и черная металлургии, переработка и транспортировка отработанного ядерного топлива (ОЯТ), атомная энергетика, судостроение, химическая промышленность, а также утилизация химических, взрывчатых веществ и ядерных боезарядов, сопряжена с экологическими рисками и вопросами безопасности населения и персонала при попадании опасных веществ в окружающую среду.

В связи с этим практически в любой отрасли промышленности стоит задача контроля герметичности узлов и изделий.

Приведем перечень некоторых нормативных документов:

- *Машиностроение и приборостроение*
  ГОСТ 24054—80. Изделия машиностроения и приборостроения. Методы испытаний на герметичность. Общие требования.
- *АЭС*
  ГОСТ 17138—81. Аппаратура контроля герметичности оболочек тепловыделяющих элементов ядерных реакторов атомных электростанций. Общие технические требования и методы испытаний.
  ОСТ 95 10054—84. Элементы активных зон ядерных реакторов. Масс-спектрометрический метод испытаний на герметичность.
  ПНАЭ Г-7-019—89. Унифицированная методика контроля основных материалов (полуфабрикатов), сварных соединений и наплавки оборудования и трубопроводов АЭУ.
- *Ракетно-космическая техника*
  ОСТ 92-1527—89. Контроль герметичности изделий с применением масс-спектрометрических гелиевых течеискателей. Методы испытаний.

- *Машиностроение и судостроение*
  ОСТ 5Р.0170—81. Контроль неразрушающий. Металлические конструкции. Газовые и жидкостные методы.
  ГОСТ 25136—82. Соединение трубопроводов. Методы испытания на герметичность.

Из этого далеко не полного перечня нормативной документации видно, что проблемам обеспечения герметичности уделяется самое пристальное внимание. Как правило, к герметичности предъявляют два основных требования:

— требование по классу, заложенное в технологию изготовления узлов и устройств, соблюдение которого обеспечивает выпуск продукции с заданными техническими характеристиками и показателями качества;

— требование по выполнению норм, обеспечивающих безопасность производства на экологически напряженных предприятиях.

В частности, на предприятиях Федерального агентства по атомной энергии (ФААЭ) обеспечение радиационной безопасности при транспортировке, хранении, переработке ОЯТ и обращении с продуктами его переработки, захоронении радиоактивных отходов (РАО) базируется на многолетнем опыте осуществления этих технологических операций, которым обладают ведомства, предприятия и организации РФ.

Экологические проблемы при захоронении и переработке РАО обусловлены, в первую очередь, наличием высокой степени потенциальной опасности нанесения ущерба окружающей среде в связи с возможностью радиационного заражения гидросферы, атмосферы, почв и причинения вреда биологическим ресурсам в процессе производства работ. Эта опасность связана с возможной утечкой радиоактивных веществ, которые в аварийной ситуации или, к примеру, при негерметичности или разгерметизации упаковочного контейнера могут попасть в окружающую среду и создать уровни загрязнения и концентрации радионуклидов в воде, на почве или в окружающем воздухе сверх допустимых значений.

Аналогичные проблемы существуют на всех экологически напряженных (опасных) производствах. К сожалению, ликвидация последствий инцидентов является технически и организационно сложной и дорогостоящей задачей, потери могут быть невосполнимы.

ОАО "Завод "Измеритель" является производителем и поставщиком приборов контроля герметичности (течеискателей) и имеет давние и прочные связи с различными предприятиями. Изготовленные на заводе приборы используются в ракетостроении, космонавтике, химическом машиностроении, атомной энергетике, машиностроении, судостроении и судоремонте, авиации, металлургии и в криогенной, электронной и фармацевтической промышленностях.

Краткая справка о заводе:

Основанный 20 сентября 1928 г. в Ленинграде, завод под названием "Артель Прогресс-Радио" был первым в отечественном радио- и приборостроении.

1930 г. — начат выпуск первых ламповых радиоприемников.

1939 г. — изготовлен первый отечественный телевизор с электронно-лучевой трубкой.

В годы Великой Отечественной войны завод не прекращал своей деятельности. В короткие сроки завод освоил и начал выпускать и поставлять Ленинградскому фронту радиопередатчики РП-14, миноискатели, детали для гранат и пистолетов, микрофоны и телефоны.

В1948 г. в рамках ядерной программы организован серийный выпуск первого отечественного масс-спектрометрического гелиевого течеискателя ПТИ-1 (универсального прибора для контроля герметичности самых разнообразных объектов и изделий).

В середине 1950-х гг. в связи с развитием холодильной промышленности разработан первый отечественный галогенный течеискатель ГТИ-1 и его модификации, которые сразу же были внедрены в серийное производство на Ленинградском заводе "Измеритель".

С 1998 г., успешно пройдя процессы адаптации к рыночной экономике и смены формы собственности, завод "Измеритель" — динамично развивающееся предприятие с ежегодным приростом выпуска продукции 40—50 %.

Кроме этого, заводом производятся радиоизмерительные приборы и медицинская техника:

— генератор сигналов низкочастотный ГЗ-110 и его модификации: ГЗ-113, ГЗ-119, ГЗ-122 в интересах МО РФ (представительство заказчика);

— установка для перекачивания и порционного разлива жидкостей "Контур П4";

— аппарат для низкочастотной физиотерапии серии "Амплипульс" и другое оборудование и приборы.

На предприятии создана сервисная служба для ремонта, технического обслуживания, организации пуско-наладочных работ, оказания услуг по контролю герметичности на любых объектах.

Деятельность ОАО "Завод "Измеритель" лицензирована, вся продукция сертифицирована. С мая 2002 г. предприятие внесено в реестр официальных поставщиков Атомстройэкспорта.

СЕРИЙНО ВЫПУСКАЕМАЯ ПРОДУКЦИЯ:

Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИ1-22

Прибор в течение пяти лет успешно эксплуатируется на предприятиях ФААЭ и Росавиакосмоса,

где показал высокую надежность, качество и удобство в эксплуатации. Используется в НПО "Энергомаш", ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, РКК "Энергия", НПО "Машиностроение", ГНП "ЦСКБ-Прогресс", НПО им. С. А. Лавочкина.

Прибор позволяет производить предварительную откачку сравнительно небольших (до 50 л) объемов исследуемых объектов собственными откачными средствами.

Техническая характеристика

Минимальный регистрируемый поток гелия, $м^3 \cdot Па/с$	$7 \cdot 10^{-12}$
Минимальный регистрируемый поток гелия при работе со щупом, $м^3 \cdot Па/с$	$1 \cdot 10^{-8}$
Время выхода на режим вакуумных испытаний, мин	15
Время реакции, с	⩽1
Питание, В	220

Гелиевый масс-спектрометрический течеискатель ТИ1-22/1

Течеискатель обеспечивает универсальность применения в различных областях промышленности, включая атомную и авиационно-космическую, и введен в методику контроля герметичности при транспортировке облученного ядерного топлива.

В приборе автоматизирован ряд процессов настройки и калибровки спектрометра, введена система самодиагностики, модернизирована вакуумная система, обеспечен прямой напуск в камеру, используются катоды с ресурсом работы до 1000 ч.

Техническая характеристика

Минимальный регистрируемый поток гелия, $м^3 \cdot Па/с$	$7 \cdot 10^{-12}$
Минимальный регистрируемый поток гелия при работе со щупом, $м^3 \cdot Па/с$	$1 \cdot 10^{-8}$
Время реакции по входу, с	<1
Время реакции со щупом 10 м, с	<5
Максимальное давление на входе, Па	$1 \cdot 10^3$
Питание, В	220
Время выхода на рабочий режим, мин.	<15

В 2005 г. создан **автоматизированный портативный гелиевый течеискатель ТИ1-30,** в котором значительно снижены массогабаритные характеристики при сохранении всех функциональных возможностей "кабинетного" течеискателя. Прибор имеет сенсорное управление, способность работы с вакуумными агрегатами исследуемых объектов или собственным форвакуумным насосом, моноблочную вакуумную систему. Течеискатель работает без применения азотной ловушки, имеет удобный пользовательский интерфейс с возможностью вывода графической и текстовой информации о работе системы, возможность архивирования с последующей печатью результатов испытаний. Применение уникального программного обеспечения позволяет использовать ТИ1-30 не только как течеискатель, обеспечивающий все способы контроля герметичности, но и как исследовательский аппарат для решения научно-технических задач.

Техническая характеристика

Минимальный регистрируемый поток гелия, $м^3 \cdot Па/с$	$7 \cdot 10^{-12}$
Минимальный регистрируемый поток гелия при работе со щупом, $м^3 \cdot Па/с$	$1 \cdot 10^{-8}$
Время реакции по входу, с	<1
Время реакции со щупом 5 м, с	<5
Максимальное давление на входе, Па	$1 \cdot 10^3$
Питание, В	220
Время выхода на рабочий режим, мин.	<3
Автоматическое поддержание давления в камере анализатора, %	±2
Автоматическая регулировка потока натекания, %	±2
Глубина архивирования	Не ограничена
Масса, кг	69

Все выпускаемые масс-спектрометрические течеискатели позволяют реализовывать контроль герметичности всеми способами, предусмотренными ГОСТ 28517.

Следует отметить, что технические характеристики отечественных течеискателей не уступают, а по ряду показателей превосходят характеристики импортных аналогов ведущих производителей, таких как ASM 122, 142 (Alcatel, Франция), Spektron 600 (Boc Edwards, Великобритания), Varian 979 (Varian, США). Так, например, лабораторные испытания ТИ1-30 позволили получить пороговую чувствительность при контроле герметичности "чистых" объектов до $3 \cdot 10^{-14}$ $м^3 \cdot Па/с$. И это при том, что в приборе не используется азотная ловушка, тогда как в импортных аналогах пороговая чувствительность ограничивается уровнем $0{,}1—5 \cdot 10^{-11}$ $м^3 \cdot Па/с$ с применением жидкого азота.

Все выпускаемые приборы снабжены высокопоточными щупами, изготовленными из цельного капилляра коррозионно-стойкой стали, длиной до 10 м. Это делает универсальным использование приборов в труднодоступных местах при полном отсутствии "гелиевой памяти". Высокая надежность выпускаемой техники, с одной стороны, и хорошо развитый сервис, с другой, делают отечественные течеискатели предпочтительными для использования в условиях современных производств.

В 2006 г. завершена разработка и комиссией ФААЭ успешно проведены приемочные испытания **портативного переносного вакуумметрического гелиевого течеискателя ТИ3-1 "Гелин".** Принцип регистрации гелиевой течи основан на изменении тока магниторазрядного насоса при попадании в разрядную камеру пробного газа. По пороговой чувствительности течеискатель в 5 раз превосходит аналог — "Heli-Test" фирмы Varian (США).

Техническая характеристика

Минимальный регистрируемый поток гелия, $м^3 \cdot Па/с$	$1 \cdot 10^{-7}$
Постоянная времени течеискателя, с	$\leqslant 5$
Готовность к режиму испытаний, мин	$\leqslant 5$
Мощность, потребляемая течеискателем от сети питания, В · А	$\leqslant 30$
Габаритные размеры без зарядного устройства, мм	$\leqslant (301 \times 252 \times 170)$
Масса течеискателя без упаковки, кг	$\leqslant 5{,}5$
Диапазон рабочих температур, °С	От –15 до 35
Предусматривается работа методами обдува и щупа	

В настоящее время проведена серия экспериментов, созданы математические модели и сформирована программа разработки новых приборов, которая является результатом исследований потребностей рынка масс-спектрометрического оборудования и, прежде всего, консультаций со специалистами ФААЭ.

Специфичность материалов, используемых на предприятиях, с одной стороны, реальная опасность для здоровья персонала и высокие требования ТБ и РБ, с другой, диктуют объективную необходимость мониторинга присутствия в окружающей среде материалов и продуктов переработки, представляющих угрозу для персонала и производственных технологий.

Одновременно с этим относительно высокая стоимость электрофизической аппаратуры, применяемой в современном производстве, и сложность, а зачастую и невозможность дезактивации оборудования производственного цикла, ограничивают ее применение в "горячих зонах". Исследования показали, что аналогичные факторы, подлежащие контролю, имеют место на целом ряде предприятий тяжелого машиностроения, химической, металлургической, целлюлозно-бумажной, пищевой и других отраслей промышленности. Новые технологии в медицине, применяемые при диагностике заболеваний и наблюдении динамики лечения больных, также диктуют необходимость создания относительно дешевых мобильных масс-спектрометрических приборов.

Это в полной мере относится к приборам контроля герметичности.

Нами проведены предварительные исследования возможности создания приборов, имеющих более широкие возможности по сравнению с применяемыми сегодня течеискателями отечественного и импортного производства на предприятиях ФААЭ и других ведомств, деятельность которых связана с переработкой вредных и опасных веществ.

В частности, начата разработка течеискателя-газоанализатора, основное назначение которого — контроль герметичности с использованием в качестве пробного любого доступного газа с достаточной проницаемостью для решения конкретных задач в пределах требуемой пороговой чувствительности. Одновременно с этим может вестись мониторинг наличия примесей элементов и соединений вплоть до трансурановых (до 360 а. е. м.). Разрешающая способность масс-спектрометра с применением аппарата математической обработки спектра — не менее 100. При наличии в спектре примесей в количествах, превышающих ПДК, прибор выдает сообщение цифровой, световой и звуковой индикацией. Для каждого типа примесей может быть установлен свой "тревожный" порог. Цифровая индикация указывает количество примеси в удобных для пользователя единицах. Этот прибор может использоваться в качестве индикатора при проведении мероприятий ЯРБ, впервые дает возможность контроля герметичности действующего оборудования внутри технологического процесса.

Аналогов прибора нами не выявлено.

Ожидаемый период разработки и изготовления опытного образца 24 месяца.

Для контроля герметичности изделий, заведомо содержащих вредные примеси, предлагается разработка **прибора, узлы и механизмы которого защищены от воздействия неблагоприятных факторов.** Этот прибор снабжается отдельным, независимым каналом транспортировки проб вещества в масс-спектрометр (метод фильтрации). Доставленная в область масс-спектрометрической камеры проба сепарируется селективной мембраной, гелий попадает в камеру, а прокачанный поток принимается улавливающим устройством. По окончании проведения работ магистраль доставки пробы, включая сепаратор и фильтр, заменяется, а отработавшая утилизируется согласно отраслевым нормам. При этом вакуумная система течеискателя и масс-спектрометрическая камера не имеют контакта с анализируемыми пробами и, соответственно, остаются чистыми. Стоимость независимой заменяемой магистрали составляет 5—7 % стоимости прибора, а время, необходимое для замены, — 10—15 мин.

Примечательно, что прибор может использовать независимый канал при работе с обычными объектами. В этом случае достигается чувствительность, в 10—100 раз превышающая чувствительность щуповых режимов, реализуемых в применяемых в настоящее время отечественных и импортных течеискателях. Кроме того, несомненным преимуществом этого прибора является то, что масс-спектрометрическая камера работает в предельно глубоком вакууме независимо от величины газового потока, подаваемого на вход "гелиевой мембраны", что снижает газовую нагрузку на вакуумные агрегаты и улучшает условия работы катода. В свою очередь, это обеспечивает увеличение ресурса работы прибора в целом.

Течеискатель может использоваться и в обычных, традиционных методиках контроля герметичности (см. таблицу).

Аналогов прибора не выявлено.

Период разработки и изготовления опытного образца 12 мес.

Для экологического мониторинга электроотрицательных примесей может быть применен **датчик-преобразователь.** Действие этого прибора основано на способности ряда элементов поглощать низкоэнергетичные электроны в газовом разряде, причем электроотрицательность возникает у большого числа элементов и соединений в газовых средах, менее отрицательных, чем анализируемые. Ряд элементов и соединений, таких как F, Cl, SF_6, остаются электроотрицательными в любых средах. Таким образом, представляется возможность ведения непрерывного мониторинга окружающей среды на предприятиях, связанных с применением веществ, имеющих отрицательность по Л. Полингу.

На базе датчика преобразователя могут быть созданы мониторинговые сети автоматизированных систем контроля окружающей среды (аналогично автоматизированной системе контроля радиационной обстановки АСКРО).

Способ применения	Давление на выходе, Па	Чувствительность, $м^3 \cdot Па/с$
Способ обдува	⩽150	$7 \cdot 10^{-12}$
Метод фильтрации	Любое	$5 \cdot 10^{-10}$
Способ щупа	⩽1000	$1 \cdot 10^{-8}$

Этот же принцип может быть использован для создания галогенного течеискателя. Этот прибор будет выпускаться в виде малогабаритного переносного устройства с автономным или сетевым питанием. Период разработки и изготовления опытного образца 12 мес.

Аналогов прибора нами не выявлено.

Все приборы создаются на базе современной микропроцессорной техники отечественного и импортного производства и будут управляться оригинальным программным обеспечением, разработанным ведущими учеными Санкт-Петербурга и Москвы.

Таким образом, перспектива развития парка масс-спектрометрических течеискателей ориентирована на расширение функциональных возможностей приборов. Наряду с традиционными задачами, направленными на увеличение надежности, повышение качества и снижение массогабаритных характеристик, мы делаем упор на применимость масс-спектрометрического оборудования в решении задач безопасности производства, транспортировки и хранения опасных веществ и экологического мониторинга окружающей среды.

"В мире неразрушающего контроля", 2007, № 1

Внимание! Информация

Воздух рабочей зоны
Точность взвешивания аэрозольных проб (ГОСТ Р ИСО 15767—2007)

Стандарт подготовлен ОАО "Научно-исследовательский центр контроля и диагностики технических систем" (ОАО "НИЦ КД") на основе собственного аутентичного перевода стандарта ИСО 15767:2003. Внесен Техническим комитетом по стандартизации ТК 457 "Качество воздуха". Утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 марта 2007 г. № 32-ст. Настоящий стандарт идентичен международному стандарту ИСО 15767:2003 "Воздух рабочей зоны. Источники погрешности взвешивания аэрозольных проб и методы ее уменьшения" (ISO 15767:2003 "Workplace atmospheres — Controlling and characterizing errors in wieghing collected aerosols"). Наименование настоящего стандарта изменено относительно наименования указанного международного (регионального) стандарта для приведения в соответствие с ГОСТ Р 1.5—2004.

При применении настоящего стандарта рекомендуется использовать вместо ссылочных международных (региональных) стандартов соответствующие им национальные стандарты Российской Федерации. Введен впервые. Дата введения 2007-08-01.

1. Область применения

Настоящий стандарт устанавливает рекомендации по снижению неопределенности, связанной с процедурой взвешивания аэрозольных проб и обусловленной нестабильностью материала, подлежащего взвешиванию. Под материалом понимают любое средство, предназначенное для улавливания взвешенных частиц (например, фильтр, пористый материал), а также элементы пробоотборника, если они должны быть взвешены во время анализа.

Настоящий стандарт применим к результатам, составленным с использованием литературных источников, а также (где это возможно) к результатам лабораторных экспериментов. Ожидаемые погрешности для конкретных методов анализа уловленных аэрозолей, по возможности, определены количественно. Приведены рекомендации по выбору материала, используемого для улавливания взвешенных частиц, методы уменьшения и коррекции ошибок, связанных с нестабильностью массы взвешиваемого материала, и рекомендации по представлению результатов измерений массы.

2. Нормативные ссылки

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие международные (региональные) стандарты:

ИСО 7708:1995 "Качество воздуха. Определение гранулометрического состава частиц при санитарно-гигиеническом контроле";

ЕН 482:1994 "Воздух рабочей зоны. Общие требования к методам измерений химического состава";

ЕН 13205:2001 "Воздух рабочей зоны. Оценка характеристик средств измерений концентрации взвешенных частиц".

3. Термины и определения

В настоящем стандарте применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1. **Пылеуловитель:** используемый для сбора аэрозольных проб материал (фильтр, пористый материал и т. п.), а также устройства для установки этого материала в пробоотборнике, подлежащие в процессе анализа взвешиванию как единое целое.

Примечание. Как пример обратного, 25 или 37 мм пластиковый фильтродержатель, часто используемый для отбора общей пыли открытым или закрытым способом, не рассматривают как часть пылеуловителя, поскольку он взвешиванию не подлежит.

3.2. **Период установления равновесия:** постоянная времени, характеризующая процесс приближения (по закону, близкому к экспоненциальному) массы материала, используемого для улавливания пыли, к равновесному значению.

Примечания:

1. Постоянная времени может быть определена как отношение среднего отклонения массы от равновесного значения к среднему значению скорости изменения массы за ограниченный период времени.

2. В некоторых случаях период времени, необходимый для приближения к равновесию (с заданной точностью), равен нескольким постоянным времени.

3. Время установления равновесия выражают в секундах.

3.3. **Холостая проба для условий применения:** чистый пылеуловитель, который подвергают той же обработке, что и пылеуловитель для отбора реальной пробы, включая в общем случае его подготовку, установку в пробоотборник или контейнер для транспортирования, транспортирование между лабораторией и местом отбора пробы, но не используют для отбора реальной пробы.

3.4. **Холостая проба для лаборатории:** чистый пылеуловитель, который подвергают той же обработке, что и пылеуловитель с пробой в лаборатории, включая подготовку и загрузку в пробоотборники или контейнеры для транспортирования (если оно предусмотрено).

3.5. **Чистый пылеуловитель:** пылеуловитель из той же партии, что и пылеуловители для отбора пробы, но не использованный для отбора пробы.

3.6. **Предел обнаружения [LOD]:** утроенное значение оцененного стандартного отклонения результата измерения массы пробы (после внесения поправок, определенных в результате процедуры двойного взвешивания до и после взятия пробы и сравнением с холостыми пробами).

Примечание. Значение LOD используют в качестве порогового для подтверждения присутствия уловленных частиц в пробе с установленной доверительной вероятностью.

3.7. **Предел количественного определения [LOQ]:** увеличенная в 10 раз оценка стандартного отклонения массы пробы.

Примечание. Значение LOQ используют в качестве порогового значения, при превышении которого массу уловленных частиц количественно определяют с установленной точностью.

4. Причины нестабильности массы и способы ее уменьшения

4.1. Общие положения

Изменение массы пылеуловителя с уловленными частицами обусловлено рядом причин, наиболее важные из которых рассмотрены ниже.

4.2. Влагопоглощение

4.2.1. Влагопоглощение — наиболее распространенная причина изменения массы. Вода может быть поглощена фильтром, пористым или любым другим материалом пылеуловителя, подлежащим взвешиванию. Кроме того, необходимо учитывать поглощение влаги любым элементом пробоотборника, который также подлежит взвешиванию, например фильтродержателем.

4.2.2. Влагопоглощение можно уменьшить использованием негигроскопичных материалов. Однако в ряде практических случаев такие материалы использовать нельзя. Перечень пылеуловителей, наиболее часто применяемых для отбора аэрозольных проб, с указанием их влагопоглощающей способности приведен в таблице.

Примечания:

1. Влагопоглощение фильтров из одного и того же материала, изготовленных различными производителями, может различаться в широких пределах.

Тип пылеуловителя или фильтродержателя	Влагопоглощение			
	Очень низкое	Низкое	Высокое	Очень высокое
Фильтр из целлюлозного волокна			*	
Фильтр из стекловолокна		*		
Фильтр из кварцевого волокна		*		
Мембранный фильтр из эфиров целлюлозы			*	
Политетрафторэтиленовый фильтр	*			
Поливинилхлоридный мембранный фильтр		*	*	
Поликарбонатный фильтр	*			
Серебряный мембраный фильтр	*			
Полиуретановая пена				*
Полиэтилентерифталатная пленка смазанная		*	*	
Алюминиевая фольга смазанная		*		
Карбосмола				*
Алюминиевый фильтродержатель		*	*	
Фильтродержатель из коррозионно-стойкой стали	*			

2. Обычно уменьшение гигроскопичности материала сопровождается повышением его проводимости. Этот эффект следует иметь в виду, выбирая материалы с низкой гигроскопичностью.

3. На гигроскопичность материалов влияет также их предварительная подготовка, например нанесение масляной пленки.

4.3. Влияние статического электричества

Статическое электричество часто является источником ошибок взвешивания. Его влияние можно свести к минимуму разрядкой пылеуловителя с использованием плазменного источника ионов или радиоактивного источника. Другим решением проблемы может быть применение токопроводящих материалов.

4.4. Влияние летучих веществ (кроме водяного пара)

4.4.1. Летучие вещества могут присутствовать в неиспользованных улавливающих средах или могут адсорбироваться средами в процессе отбора проб.

4.4.2. Десорбцию летучих веществ из неиспользованных сред проводят путем их нагревания или обработки кислородной плазмой перед подготовкой к отбору пробы и взвешиванию. Другим решением является корректирование влияния летучих веществ сравнением с холостой пробой (см. раздел 5).

4.4.3. Если летучие вещества, уловленные во время отбора пробы, являются составной частью этой пробы, то для их сохранения (или по крайней мере учета их потери) перед взвешиванием используют известные стандартные процедуры, например готовят пробу к взвешиванию в строго установленных условиях.

4.4.4. Если летучие вещества, уловленные во время отбора пробы, частью пробы не являются, то оценить их влияние сложно, если единственной формой анализа является взвешивание. В этом случае рекомендуется использовать несорбирующие среды.

4.5. Механические повреждения

4.5.1. При использовании пылеуловителей из ломких материалов необходимо принимать меры по предотвращению их повреждений.

4.5.2. Пробоотборник должен быть сконструирован таким образом, чтобы исключить повреждение пылеуловителя при его сборке и разборке.

4.5.3. Для выемки и установки фильтров используют пинцет с плоскими губками. Хрупкий пылеуловитель для последующего взвешивания может быть помещен в форму из неокисляющегося металла.

4.5.4. Не допускают контакта рук, не защищенных перчатками, с частями пробоотборника, подлежащими взвешиванию.

4.5.5. Перчатки не должны оставлять следов на частях, подлежащих взвешиванию.

4.5.6. Все работы проводят в чистом помещении.

4.6. Выталкивающая сила воздуха

Поправку на выталкивающую силу воздуха вычисляют как произведение плотности воздуха на объем вытесненного воздуха. Поправку не применяют для объектов малого объема, таких как мембранный фильтр диаметром 37 мм, но ее необходимо учитывать, когда взвешиваемый объект является достаточно большим (например, если взвешиванию подлежит фильтродержатель, а сравнение с холостой пробой не используют). Например, если объем взвешиваемого объекта превышает 0,1 $см^3$, а разность давлений, при которых проводят взвешивания,

составляет около 10 % (если процедуру взвешивания проводят на разных высотах), то корректирующая поправка может составить до 0,1 мг. При необходимости введения поправки на выталкивающую силу воздуха регистрируют атмосферное давление и температуру воздуха в момент взвешивания.

5. Внесение поправки на нестабильность массы путем использования холостых проб

5.1. Общие положения

Существуют разные способы уменьшения нестабильности массы. Наиболее часто применяемый на практике способ уменьшения погрешностей из-за нестабильности массы — использование холостых проб. Вносимая поправка на нестабильность массы зависит от конкретного применения и должна следовать описанной процедуре. Суть состоит в следующем. Чистый пылеуловитель должен находиться в условиях реальной среды отбора пробы, но без прогонки через него анализируемого воздуха. Поправку рассчитывают, вычитая среднее изменение массы чистого пылеуловителя из изменения массы пылеуловителя, использованного для отбора пробы. Следует иметь в виду, что данная процедура не позволяет рассчитать поправку точно, если в воздухе содержатся капли воды или другие летучие вещества. Пробоотборник, используемый для отбора холостой пробы, должен быть парным пробоотборнику, используемому для отбора реальной пробы, т. е. если взвешиванию подлежит пробоотборник, состоящий из фильтра в фильтродержателе, то при взвешивании реальной и холостой проб должен быть использован один и тот же тип фильтра в фильтродержателе.

Примечание. Использование холостых проб обычно позволяет нивелировать различие фильтров от разных изготовителей.

5.2. Минимальное число холостых проб

Рекомендуется, чтобы на каждые 10 реальных проб приходилась по крайней мере одна холостая проба. Используемые в настоящее время схемы измерений требуют от одной до четырех холостых проб в партии пылеуловителей.

5.3. Время и последовательность взвешивания

Холостые пробы чередуют с реальными пробами до и после отбора проб для обнаружения систематических изменений массы (например, обусловленных сорбцией или испарением загрязнителя за время взвешивания).

5.4. Время подготовки пробы к взвешиванию

Время подготовки пробы, необходимое для достижения равновесия пробы с окружающей средой в месте взвешивания, может варьироваться от нескольких часов до нескольких недель в зависимости от особенностей среды для отбора проб. Как правило, при отборе пробы в рабочей зоне подготовку осуществляют за одну ночь. Введение поправок с использованием холостых проб особенно важно для сред с продолжительным периодом установления равновесия.

5.5. Условия хранения

Неиспользованные пылеуловители до взвешивания и кондиционирования хранят в чистой лаборатории, где условия окружающей среды незначительно отличаются от условий весовой комнаты. После первого взвешивания пылеуловители хранят вместе с взвешенными холостыми пробами и используют в пределах установленного срока годности. Требования к сроку годности и условиям хранения должны составлять часть методики анализа.

Примечание. Срок годности зависит от улавливающей среды, условий хранения, материала фильтродержателя и значений LOQ или LOD.

Контрольные пробы хранят вместе с взвешенными чистыми пылеуловителями в чистой лаборатории в условиях, незначительно отличающихся от условий весовой комнаты. Если фильтры и фильтродержатель хранят вместе, между ними возможен массоперенос.

6. Транспортирование проб в лабораторию

6.1. Общие положения

Требования к транспортированию проб составляют часть методики выполнения измерений. Необходимо удостовериться, что процедура транспортирования позволяет избежать значительных потерь массы пробы.

Основные проблемы, встречающиеся в ходе обработки и транспортирования уловленного материала, следующие:

— осыпание с пылеуловителя (в случае, если фильтр отделяется от фильтродержателя) в транспортный контейнер, что приводит к потере части массы пробы;

— загрязнение фильтродержателя и крышки (если она имеется), которое может привести к увеличению погрешности, в том случае, если они являются частью пылеуловителя;

— попадание части пыли при отсутствии крышки из фильтродержателя в контейнер для транспортирования;

— попадание пыли с фильтродержателя на пылеуловитель.

6.2. Рекомендации по упаковке

6.2.1. Фильтр для отбора пробы, не закрепленный в фильтродержателе, транспортируют в чашке Петри, оловянном или другом закрытом контейнере.

6.2.2. Рекомендуется, чтобы подлежащие транспортированию фильтродержатели с закрепленными в них фильтрами имели крышки. Если проба состоит из всей пыли, осевшей внутри фильтродержателя (с фильтром), то пыль, высыпавшуюся из фильтродержателя на крышку во время транспортирования, также необходимо взвешивать.

6.2.3. Запечатанные пылеуловители транспортируют в соответствующем контейнере или пакете. Дно, верх и стены контейнера должны быть выложены губчатым материалом (предпочтительно электропроводящим), который смягчает транспортную тряску и тем самым защищает пробы при транспортировании.

6.2.4. Должны быть приняты меры, предотвращающие чрезмерное нагревание или охлаждение проб во время транспортирования.

Примечания:

1. Для транспортирования нестабильных частиц или биологических материалов используют специальные процедуры.

2. При возможной потере пыли с пылеуловителя ее транспортирование осуществляют в контейнере, который также должен быть взвешен.

7. Оборудование для взвешивания, методика взвешивания

7.1. Весы

Весы выбирают в зависимости от применяемых пределов количественного определения (см. раздел 8) и максимальной массы, подлежащей взвешиванию.

При отборе проб воздуха рабочей зоны используют весы, позволяющие измерить массу с точностью до пяти или шести значащих цифр. Весы периодически калибруют с использованием образцовых мер массы.

Примечание. В одном из экспериментов были проведены повторные взвешивания фильтров диаметром 25 мм, которые в период между взвешиваниями хранили в вентилируемых жестяных коробках в нестрого контролируемых условиях. Сравнивали весы, измеряющие с погрешностью до 1 мкг (шесть значащих цифр), и весы с погрешностью до 10 мкг (пять значащих цифр). Был сделан вывод, что использование более точных весов позволило в 2 раза уменьшить стандартное отклонение в условиях повторяемости. Промежуточная прецизионность в пределах суток меньше, чем в интервале несколько суток, но именно она важна с точки зрения точности измерений, так как дополнительная межсуточная изменчивость корректируется применением холостых проб.

7.2. Рекомендации по контролю условий взвешивания

7.2.1. Уравновешивание и взвешивание пробы проводят в одних и тех же условиях, т. е. в одной весовой комнате или термокамере. Постоянные условия окружающей среды поддерживают одним из следующих способов:

— весы, пробы и персонал, проводящий взвешивание, постоянно находятся в весовой комнате;

— весы и пробы находятся в термокамере с контролируемыми параметрами окружающей среды, которая, в свою очередь, находится в чистой лаборатории.

Примечание. В ряде случаев параметры окружающей среды можно поддерживать на постоянном уровне без принудительного кондиционирования. Но в общем качество гравиметрического анализа в сильной степени зависит от качества контроля окружающих условий.

7.2.2. Контроль температуры и влажности в термокамере или весовой комнате необходим в случае анализа проб, чувствительных к этим факторам (т. е. гигроскопичных). Температуру поддерживают постоянной в пределах ±2 °С, относительную влажность — в пределах ±5 %. Заданные температура и влажность должны находиться в рабочем диапазоне, рекомендуемом изготовителем весов (например, (20 ± 2) °С для температуры и (50 ± 5) % — для RH). Взвешивание не рекомендуется проводить в сухой атмосфере (при относительной влажности менее 20 %), так как в таких условиях повышается вероятность накопления на пробах электростатического электричества. Применяемая система контроля окружающих условий должна обладать способностью компенсировать влияние источников тепла и влаги, какими являются, например, работающий персонал или применяемые электроприборы.

Примечание. Кондиционировать воздух в термокамере нет необходимости, так как в нее можно впускать через приточно-вытяжную систему отфильтрованный лабораторный воздух.

7.2.3. Содержание твердых частиц в воздухе весовой комнаты или термокамеры для взвешивания должно быть сведено к минимуму с помощью фильтрации.

7.2.4. Подаваемый свежий воздух не должен воздействовать на здоровье и безопасность персонала, работающего в весовой комнате или лаборатории. Турбулентное движение воздуха, вызванное вентиляцией или средствами контроля влажности в весовой комнате или термокамере, должно быть минимальным, чтобы избежать его влияния на показания весов.

7.3. Другие требования к оборудованию

В местах установки весов должна отсутствовать вибрация (например, вследствие работы лифтов или машин вращательного действия). Чтобы уменьшить передаваемую вибрацию, весы можно устанавливать на массивный стол (например сделанный из двухсоткилограммового блока мрамора). Место для взвешивания должно быть удалено от дверей, окон, воздуховодов, источников излучения (светового, электромагнитного, теплового), например сушильных шкафов. Весы должны быть обеспечены стабильным электропитанием.

7.4. Методика

7.4.1. Методика проведения взвешивания должна быть документирована.

7.4.2. Период приведения пробы в равновесие по отношению к температуре и влажности весовой комнаты или термокамеры должен быть выбран в зависимости от пробы. Пробы держат в чистых контейнерах, но открытых для доступа воздуха.

Примечание. Для проб, отобранных во влажной атмосфере и содержащих избыток влаги, иногда перед приведением в равновесие используют осушку.

7.4.3. Непосредственно перед помещением пробы на чашу весов ее следует, по возможности, освободить от статического электричества, например внутрь термокамеры может быть помещен нейтрализатор статического электричества.

7.4.4. Показания весов снимают только после их стабилизации.

7.4.5. При необходимости переустанавливают нуль.

Примечание. Иногда по аномальным показаниям весов можно судить о дефекте взвешиваемого пылеуловителя.

8. Рекомендации по представлению результатов намерений

8.1. Если измеренная масса превышает значение предела количественного определения LOQ, то это указывают в протоколе измерений.

8.2. Если измеренная масса находится в интервале между значениями предела обнаружения LOD и LOQ, то, приводя результат измерений, этот факт указывают в протоколе измерений.

8.3. Если измеренная масса меньше значения LOD, то в протоколе указывают только этот факт без приведения результата измерений.

Примечания:

1. При превышении значения LOD вероятность ложного обнаружения составляет менее 1 % (если оценка точности метода проводилась с использованием максимального числа степеней свободы).

2. Иногда полученные в серии измерений значения массы взвешенных частиц можно использовать для подтверждения присутствия этих частиц даже в том случае, если результат каждого отдельного измерения не превышает LOD. В данном случае в протоколе указывают фактические значения результатов измерений.

8.4. Значения LOD и LOQ должны быть определены и приведены в протоколе.

Ссылка на данный материал как официальный документ не допускается

А. П. КУЗНЕЦОВ, канд. техн. наук
Воткинский филиал ИжГТУ

Теоретическое обеспечение разработки программ технического развития производственных систем

В настоящее время требования, которые предъявляют к изделиям (качество, стоимость и др.), не все предприятия в состоянии выполнить. Если не вдаваться в подробности макроэкономических просчетов и если говорить о том, что на предприятии появился хозяин и не важно, в результате каких процессов (приватизации, прихода руководителя "высшей формации", давления государства и др.), то такому руководителю необходимо решать значительное количество задач, которые очевидны и не будут в данной работе перечислены все. В этом нет необходимости. Но то, что руководитель просто не уйдет от задачи адаптации существующей производственной системы (ПС) предприятия к перечисленным требованиям к изделиям, не вызывает сомнений. Все это потребует воли руководителя, а также существенных финансовых инвестиций.

Итак, проблема — предприятие не может изготовить изделия с требуемыми показателями качества и в рамках требуемой себестоимости.

Обращаясь к опыту ученых, производственников, необходимо сказать, что таких работ выполнено большое количество и большинство из них общепризнанны [1—3] и являются в некотором смысле реперными точками процесса научного познания в этой области.

Проблема определена и ее необходимо решать. Перед руководителем возникает вопрос, каким образом это выполнить. Технический совет предприятия (научно-технический совет, инновационный совет, совет по техническому развитию и т. д.), состоящий из компетентных специалистов, вполне в состоянии определить "узкие" места производства и дать обоснованные рекомендации по повышению эффективности производства того или иного изделия или группы изделий. Однако проанализировать ситуацию в комплексе не всегда возможно. В конечном итоге руководитель остается один на один с проблемой и задачами, которые она влечет за собой. Именно на этом этапе руководителю необходим формальный инструмент, который позволил бы упорядочить творческую составляющую и довести до логического окончания процесс принятия решения.

Перед руководителем предприятия и самим предприятием стоит проблема выбора из трех вариантов.

1. Оставить все, как есть, и сориентировать предприятие на другой спектр изделий, которые бы могли конкурировать на рынке.

2. Провести модернизацию производства и "очаговыми" изменениями "подогнать" ПС под необходимую номенклатуру изделий.

3. Выполнить полный реинженеринг ПС предприятия и выйти на рынок в совершенно другом качестве — современная ПС и конкурентоспособная продукция.

Такой выбор — это выбор совершенно разных по порядку финансовых затрат, которые потребуются для каждого варианта. И здесь возникает вопрос, насколько "старая", "модернизированная" или "новая" ПС предприятия будут эффективны при изменении номенклатуры изделий? Для этого требуется формальный инструментарий, позволяющий провести моделирование ситуации.

Отсутствие формального инструмента сдерживают три проблемы: формализация синтеза ПС, выбора ПС и расчета показателей эффективности ПС. Возможно, специалисты добавят сюда еще десяток проблем. Однако все они будут включать в себя эти три.

В данной работе предлагается научно обоснованно подойти к решению первых двух проблем с учетом теоретических основ структур-стратегий ПС машиностроения, критериев выбора и аксиоматики выбора элементов ПС, необходимых для логического завершения работы.

Введем следующие определения.

Под *структурой-стратегией ПС* машиностроения понимают определенный набор ее элементов и упорядоченных вариантов технологий: изготовления изделий, передачи информации, организации управления, реализующих этапы жизненного цикла изделий.

Элементы и технологии взаимно адаптированы с изделиями определенной конструктивно-технологической сложности. Более подробно результаты исследования в области конструктивно-технологической сложности (КТС) приведены в работах [4, 5].

КТС учитывает такие параметры изделия, как точность, материал, заготовка, качество поверхности, число конструктивно-технологических элементов (КТЭ), и может служить технико-экономическим показателем, позволяющим классифицировать изделия по группам относительно их трудоемкости и сложности изготовления.

Структуру-стратегию представим в виде кортежа

$$F = <T; I; O>,$$

где T, I, O — технологическая, информационная и организационная структуры соответственно.

Тогда отношение F над этими множествами определяется через декартово произведение множеств T, I, O:

$$F = T \times I \times O.$$

Множество F — декартово произведение, выберем какое-либо собственное подмножество $F^C \in F$, которое определит конкретное отношение на множествах T, I, O или взаимосвязь между этими множествами, т. е. это отношение фиксирует взаимосвязь между элементами T, I, O:

$$F^C \in T \times I \times O.$$

Множество F^C будем называть *множеством вариантов изготовления изделия определенной конструктивно-технологической сложности.*

Очевидно, что изделия могут быть изготовлены в разных структурах-стратегиях.

Модель структур-стратегий ПС машиностроения. В общем виде модель F_i^C представим следующим образом:

$$F_i^C = (ST_k, US_j, \Phi_i, PK_i^Q, PP_i^Q, OP_i^Q, I_i^Q, BL, G),$$

где ST_k — k-е состояние системы; US_j — j-й вектор внешних условий; Φ_i — показатель i-й структуры-стратегии; PK_i^Q — множество вариантов реализации проектно-конструкторских работ в i-й структуре-стратегии; PP_i^Q — множество вариантов реализации технологической подготовки производства в i-й структуре-стратегии; OP_i^Q — множество вариантов реализации опытного производства в i-й структуре-стратегии; I_i^Q — множество вариантов реализации информационного сопровождения продукции в i-й структуре-стратегии; BL — критерий Байеса—Лапласа; G — гибкий критерий.

Результаты исследований [3] показали, что каждая модель F_i^C имеет свои особые характеристические кривые $\phi_i = f((US_j)(ST_i))$ (ϕ_i — эффективность системы при i-й структуре-стратегии ПС машиностроения [4]; $US_j = (US_1, ..., US_k)$ — вектор внешних условий; $(ST_k) = (ST_1, ..., ST_k)$ — состояния системы).

Эффективность всего множества F_i^C структур-стратегий (минимальные финансовые и временные затраты, высокое качество изделий, надежность производственных процессов и т. д.) описывается не единственной кривой, а набором из числа имеющихся структур-стратегий и интервалов КТС.

Рассматривая структуры-стратегии представленным выше образом, необходимо говорить об их развитии в случае изменения КТС производственной программы. Здесь необходимо ввести понятие состояния структур-стратегий, так как это требует понимание тенденции ее развития.

Вектор внешних условий. Под вектором внешних условий US_j будем понимать следующее:

$$US_j = (C_j^L, N_j, P_j),$$

где C_j^L — конструктивно-технологическая сложность j-й группы изделий; N_j — число изделий j-й группы изделий; P_j — вероятность изготовления j-й группы изделий в F_i^C структуре-стратегии.

В качестве основной характеристики осваиваемого изделия принимается показатель его КТС.

Результаты исследования показали [4] целесообразность введения параметра, характеризующего вероятность появления изделия определенной КТС и величины партии.

Возможно несколько способов задания вектора внешних условий: детерминированно, стохастически и гипотетически.

Необходимо учесть, что в матрице решений значения вектора внешних условий могут по параметрам задаваться различными способами. В связи с этим необходимо предусмотреть различные виды критериев выбора.

Аксиоматика выбора элементов структур-стратегий ПС машиностроения. Множество вариантов реализации структур-стратегий ПС машиностроения обусловливается наличием PK_i^Q, PP_i^Q, PP_i^Q и I_i^Q. В связи с этим необходимо формализовать процесс наполнения данных множеств.

Формализованную схему решения этой задачи можно записать следующим образом [6]:

$$Q \to A \to \text{opt}G \to x,$$

где Q — ситуация принятия решения — внешнее состояние; A — аксиоматика принятия решения, представляющая набор аксиом, определяющих схему компромисса, т. е. принцип упорядочения возможных решений; opt$G$ — обобщенный критерий оценки эффективности; x — решение, определенное на допустимом множестве решений.

В общем случае логика принятия решения описывается следующим высказыванием (посылкой):

$$A(e', s) \to B(s), \qquad (1)$$

где $A(e', s)$ — высказывание "для обработки элемента e' используется станок s"; $B(s)$ — высказывание "станок s входит во множество станков, используемых для обработки детали".

При этом из всего множества рассматриваются только те элементы e, которые входят в деталь d. Вследствие этого высказывание (1) примет следующий вид. Если существует деталь из множества d, которая включает в себя хотя бы один элемент из множества e и каждый этот элемент обрабатывается хотя бы на одном станке из множества s, то этот станок из множества s входит во множество используемых станков:

$$\exists d \exists e C(d, e) \wedge \forall e \exists s A(e, s) \to B(s), \qquad (2)$$

где $C(d, e)$ — высказывание "элемент e входит в деталь d".

Так как посылка (2) представлена в конъюнктивной форме, высказывание $B(s)$ будет истинным при условии истинности $A(e, s)$ и $C(d, s)$.

Истинность высказывания $C(d, s)$ определяется экспертами при декомпозиции детали на КТЭ. Результатом декомпозиции является выделение из множества e подмножества e', которое включает все КТЭ, входящие во множество деталей d.

Истинность высказывания определяется $A(e', s)$ следующим образом: определим состав множества M как совокупность деталей (множество D) и оборудования (множество S'), которое может быть использовано для их обработки. Результат процедуры принятия решений — множество S', содержащее перечень оборудования, необходимого для выполнения всех операций по обработке деталей множества D.

Каждая деталь множества D описывается кортежем, описывающим основные свойства детали и множество КТЭ [4, 5]. Каждый конструктивно-технологический элемент представляет одну или несколько поверхностей де-

тали, для обработки которых применяется одна технологическая операция:

$$D = \{d_1, ..., d_i, ..., d_n\},$$

$$d_i = \langle Type, Length, Width, Height, Diameter, Material, КТЭ^i \rangle,$$

$$КТЭ^i = \{\text{ктэ}^i_1, \text{ктэ}^i_2, ..., \text{ктэ}^i_j, ..., \text{ктэ}^i_m\},$$

$$\text{ктэ}^i_j = \langle Code, OpType, CPU, Size, JT, Ra \rangle,$$

где *Type* — тип детали; *Length*, *Width*, *Height*, *Diameter* — габаритные размеры детали, мм; *Material* — материал детали; *Code* — код элемента; *OpType* — типовая операция, используемая для обработки элемента; *CPU* — необходимое наличие системы ЧПУ; *Size* — вектор размеров элемента, мм; *JT* — точность приоритетного размера элемента; *Ra* — параметр шероховатости элемента.

Необходимо отметить, что признаки *Code*, *OpType* и *CPU* представляют уникальный классификационный код КТЭ, учитывающий как основные геометрические закономерности его формообразования, так и типовой технологический метод его обработки.

Каждый элемент множества $S^/$ описывается набором параметров

$$s_i = \{Type, SPU, MaxDetailSize, Weight, PrecisionClass, AllowedOperations\},$$

где *Type* — конечное множество типов оборудования; *CPU* — признак наличия ЧПУ; *MaxDetailSize* — максимальный размер заготовки; *Weight* — масса станка; *PrecisionClass* — класс точности оборудования; *AllowedOperation* — множество операций, выполняемых на оборудовании.

Процедура выбора оптимального состава множества $S^/$ состоит из двух этапов:

— включения во множество $S^/$ всех возможных элементов множества *S*, удовлетворяющих условиям обработки типовых КТЭ;

— формализации и решения задачи выбора оптимального состава множества $S^/$, подразумевающей последовательное исключение элементов из множества $S^/$ в соответствии с заданными граничными условиями.

Каждый элемент множества $S^/$ представляет кортеж параметров $s'_k = \langle \text{ктэ}^i_j, \{s_1, s_2, ..., s_i, ..., s_n | s_i \in S\} \rangle$. Сформулируем аксиому принятия решения о включении элемента s_i во множество $S^/$ в виде следующего обобщенного утверждения, формируемого для каждого d_i. $КТЭ^i$ множества *D*:

$$f_1 \wedge f_2 \wedge f_3 \rightarrow S' \cup s_i,$$

где f_1 — функция, учитывающая тип детали и станка; f_2 — функция, учитывающая тип операции, необходимой для обработки КТЭ, возможность ее выполнения на конкретном станке и необходимость использования при этом станка, оборудованного системой ЧПУ; f_3 — функция, учитывающая размер обрабатываемой детали и максимальный размер детали, которая может быть обработана на конкретном станке.

Функции f_1, f_2, f_3 являются логическими. Следовательно, учитывая, что утверждение — для объединения результатов функций используются операции конъюнкции — будет верно лишь в том случае, когда результатом каждой из функций будет "истина".

Алгоритм принятия решений на большинстве этапов синтеза структур-стратегий ПС машиностроения может быть сведен к количественной оценке соответствия анализируемого изделия, определяемой совокупностью значений ее признаков *P*, классу решений A_i из некоторого множества *S*. Комбинация решений, выбранных на всех этапах, составит структуру-стратегию ПС машиностроения изготовления изделий определенной КТС. Это позволит значительно сократить исходные массивы *S* и *D*. Для выбора решения может использоваться статистическое решающее правило по максимуму апостериорной вероятности — формула Байеса для случая *m* гипотез. Расчет ведется последовательно по всем *n* признакам, используемым для выработки решения на данном этапе синтеза.

Критерии выбора структур-стратегий ПС машиностроения. Процедура выбора характеризуется показателем эффективности $\phi_i F_i^C$ структуры-стратегии ПС машиностроения, зависящим от вектора внешних условий *ST*, а также ее вариантов. В связи с этим и исходя из того, что в векторе внешних условий учитывается вероятность появления того или другого параметра, в качестве критерия выбора приняты два — критерий Байеса-Лапласа *BL* и гибкий критерий *G*. Данные критерии могут быть использованы как вместе, так и отдельно.

В условиях, когда параметры вектора внешних условий заданы детерминированно, с точки зрения времени проведения процедуры выбора более целесообразно применять критерий *BL*.

В том случае, если хотя бы один параметр находится стохастически, необходимо использовать критерий *G*.

Оценочная функция [6]:

$$Z_{BL} = \max_i \phi_{ir};$$

$$\phi_{ir} = \sum_{j=1}^{n} \phi_{ij} P_j;$$

$$F_0 = \{F_{i0} | F_{i0} \in F \Lambda \phi_{i0} = \max_i \sum_{j=1}^{n} \phi_{ij} P_j \Lambda \sum_{j=1}^{n} P_j = 1,$$

где Z_{BL} — оценочная функция критерия *BL*; ϕ_{ij} — показатель эффективности *i*-й ПС в зависимости от *j*-го внешнего состояния; F_i — структура-стратегия *i*-й производственной системы.

Рассуждения по второму случаю (параметры вектора внешних условий стохастические) составляют основу для такого критерия выбора решения, который гибко сочетается с качественными характеристиками исходной информации и числом предстоящих реализаций решения, что характеризуется, соответственно, эмпирическим и прогностическим доверительными факторами. Кроме того, проводится учет возможного риска, ограниченного его допустимой величиной. С помощью пяти, требующих обязательного выполнения условий G_1—G_5, опишем множество F_0 оптимальных, согласно данному гибкому критерию, решений $F_i \in F_0$ в виде [7]

$$F_0 = \{F_i | G_1 \wedge (G_2 \vee G_3) \wedge G_4 \wedge G_5\}.$$

При этом условия формально характеризуются следующими соотношениями:

G_1: $F_i \in F_0$;

G_2: $V(\alpha)_i = V_{доп}$; $V(\alpha)_i$ — доверительный фактор;

$V_v^w(\alpha)_i$ или $V_v(\alpha)_i$ или $V^w(\alpha)_I$,

$V_{доп}$ — максимально допустимый доверительный фактор;

G_3: $Zmm - \min\limits_j \phi_{ij} \leqslant \varepsilon_{допi}$;

G_4: $Zr = \mu^* = \max\limits_I \{V(\alpha)_i \sum\limits_{j=1}^{n} \phi_{ij} h_j + (1 - (\alpha)_i) \times$

$\times (\min\limits_j \phi_{ij} + e_i)\}$,

Zr — гибкая оценочная функция;

G_5: $\mu^{**} = \max\limits_{i: E_j \in E^*(\varepsilon)} \sum\limits_i \phi_{ij} h_j$.

Условие G_1 говорит о том, что при выборе оптимального варианта решения рассмотрению подлежат все возможные варианты из множества F. Условия G_2 и G_3 определяют границы допустимого риска при использовании гибкого критерия G_4. При этом лицо, принимающее решение, может ограничить величину риска по собственному усмотрению путем выбора условия G_2 или G_3.

ВЫВОДЫ

Предлагаемая в данной работе методика применена в качестве математического и методического обеспечения информационно-аналитической системы оценки эффективности предприятий машиностроения. Сама аналитическая система использовалась при разработке программ технического развития ряда предприятий машиностроения Уральского региона. Она позволила реально оценить и обосновать необходимость приобретения того или иного оборудования для многономенклатурных машиностроительных производств данных предприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Полуянов В. Т.* Структурные преобразования в технологии механосборочного производства. М.: Машиностроение, 1973. 280 с.
2. *Цветков В. Д.* Системно-структурное моделирование и автоматизация проектирования технологических процессов. Минск: Наука и техника, 1979. 264 с.
3. *Чарнко В. Д.* Основы выбора технологического процесса механической обработки. М.: Машгиз, 1963. 287 с.
4. *Якимович Б. А., Толмачев В. Г., Коршунов А. И.* Логико-вероятностная модель конструктивно-технологической сложности изделий машиностроения // Вестник ИжГТУ. 1999. № 1.
5. *Теория* сложности / Ю. С. Шарин, Б. Я. Якимович, В. Г. Толмачев, А. И. Коршунов. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 1999.
6. *Мушик Э., Мюллер П.* Методы принятия технических решений / Пер. с нем. М.: Мир, 1990.

В. О. СОКОЛОВ, д-р техн. наук
(Пензенский ГТУ),
А. С. КУЛИКОВ, инж.
(Пензенский государственный педагогический университет)

Обеспечение эффективности машиностроительного производства средствами АСТПП

Одной из основных задач современного производства является повышение его технологической эффективности на информационном производственном потенциале. Только на этой основе можно обновлять материальную базу предприятия. Применение отдельных суперпроизводительных станков сегодня не обеспечивает эффективную работу всей производственной системы, так как суммарная эффективность технологий не зависит от решения какой-то частной задачи конкретного технологического маршрута. Сбалансированность всего производства может решить как частные задачи индивидуальных технологий, так и получить суммарный экономический эффект, достаточный для позитивного движения основных фондов, приводящего к необходимой структуре групп оборудования и в достаточном их количестве, своевременной замене устаревших моделей оборудования предприятия. Следовательно, компьютерная поддержка на базе автоматизированной системы технологической подготовки производства (АСТПП) всех уровней планирования технологической подготовки серийного производства становится актуальной. Она обеспечивает сокращение трудоемкости операций технологических маршрутов и непроизводительных потерь времени в рамках производственного цикла, позволяет получить экономию трудозатрат, соизмеримую с механической обработкой одной трети программы выпуска, т. е. реализуется информационный потенциал технологических возможностей производства для внедрения наилучших вариантов технологических решений.

В основу АСТПП положен расчет загрузки производственной мощности единицы планирования, ее цель — выбор наилучших технологических решений по изготовлению программы выпуска и планирование ее запуска без "узких мест" на производстве. Тем самым фактические трудозатраты изготовления деталей максимально приближены к плановым.

АСТПП позволяет решать следующие задачи обеспечения оптимальности технологических решений:

— введенные уровни проектирования при динамичном поведении технологий в процессе производства позволили поэтапно провести подготовку и приведение по конструктивно-технологическому подобию деталей и запуска программы выпуска;

— в результате статического расчета загрузки оборудования перераспределяется группа "лимитирующего оборудования" и определяется точка безубыточной ра-

боты единицы планирования на программе выпуска, что позволяет с практически приемлемой точностью осуществить планирование стратегического уровня;

— на тактическом уровне планирования создается макет производственного цикла на приведенной к рациональному виду технологии изготовления деталей;

— оперативный уровень планирования обеспечен интерактивным режимом работы АСТПП и на нем вносятся изменения в макет по текущей ситуации производства. В результате своевременно применяются рациональные технологические решения, устраняются непроизводительные потери времени, сокращаются затраты производства;

— при компьютерной поддержке производства в автоматизированной среде могут быть получены фактические нормы выработки и на их основе наиболее точные выходные технико-экономические показатели производства.

Создание АСТПП базируется на математической модели [1], где матрица A представляет фиксированное состояние производственной системы и ее компоненты связаны с количественными показателями программы неравенством

$$\Sigma a_{ij}x_j < b_i, \qquad (1)$$

где a_{ij} — трудоемкость обработки единицы j-й группы деталей на i-й группе оборудования; x_j — объем выпуска n j-й группы в плановом периоде; b_i — фонд рабочего времени i-й группы в плановом периоде.

Тогда матрица

$$A = \begin{matrix} a_{11} \dots a_{12} \dots a_{1n} \dots a_{1j} \\ a_{21} \dots a_{22} \dots a_{2n} \dots a_{2j} \\ a_{i1} \dots a_{i2} \dots a_{in} \dots a_{ij} \\ a_{m1} \dots a_{m2} \dots a_{mn} \dots a_{mj} \end{matrix}. \qquad (2)$$

Приведение данных трудоемкости операций механической обработки к матричному виду производится последовательно через преобразования первичных данных технологической таблицы A^1 с блочной структурой

$$A^1 = \begin{matrix} A_1 \quad A_2 \dots A_k \\ A_{k+1} \dots \dots A_l \\ \dots \quad \dots \dots A_n \end{matrix}, \qquad (3)$$

где A_n-й блок с компонентами вектора количества $\vec{K}$ над ним имеет вид

$$A_n = \begin{matrix} k_1 \quad k_2 \quad k_3 \quad k_n \\ a^1_{11} \; a^2_{12} \; a^3_{13} \; a^n_{1n} \\ a^1_{21} \; a^2_{22} \; a^3_{23} \; a^n_{2n} \\ a^1_{l1} \; a_{l2} \; a^3_{l3} \; a^{l_n}_{ln} \end{matrix} = \begin{matrix} k_x \\ b^x_1 \\ b^x_2 \\ b^x_l \end{matrix}, \dots, \dots . \qquad (4)$$

После расчета величин партий отдельных деталей, входящих в комплексный маршрут, определяют k_x как сумму компонентов числа деталей в группе — $k_x = \sum_1^n k$. Умножая вектор-столбец $\vec{B}_l$ на нормативный коэффициент, получаем скорректированное время операций типового маршрута обработки деталей группы приведения. Затем после учета числа деталей в партии определяем время периода оборота комплексного маршрута обработки.

Таблица

λ	s_1	s_2	s_3
g_1	q_{11}	q_{12}	q_{13}
g_2	q_{21}	q_{22}	q_{23}
g_3	q_{31}	q_{32}	q_{33}

Примечание. g_1 — реализация эффективных технологий; g_2 — обычный запуск программы; g_3 — неопределенность/ненормированные трудоемкости; s_1 — стратегия к увеличению эффективности; s_2, s_3 — стратегия планового и неподготовленного запусков соответственно.

Состоянием производственной системы управляет функция λ матрицы состояний (см. таблицу). Интерпретации при анализе состояний системы задаются ее аргументом q, который образуется пересечением табличных данных $\hat{g}$ и $\hat{s}$.

Столбцы блока, принадлежащие области эффективных технологий (они расположены ниже диагонали матрицы таблицы), отражают нормированные трудоемкости операций маршрутов обработки оригинальных деталей группы приведения по типу базового производства.

Решение вопроса запуска программы реализуется в АСТПП на дополнительной модели. Если считать, что теоретический период времени обработки программы выпуска равен длине линейно-графического производственного цикла критической линии маршрутов с наибольшим весом, в цикловом виде вся программа может быть развернута в параллельные линии однородных технологических процессов на графике загрузки оборудования (рис. 1).

Элементы динамики производственного цикла в аналитическом виде описывает характеристическое уравнение [2]

$$T_{\text{пц}} = \sum_1^n ((\sum_{j=1}^{k_g} t_{ij} + \sum_{j=1}^{k_g} t_{mj} + \sum_{j=1}^{k_{g-1}} t_{\text{пер}.mj})l_j), \qquad (5)$$

где $T_{\text{пц}}$ — цикл обработки одной линии маршрутов деталей программы; t_{ij} — время обработки одной партии деталей j-го наименования, обрабатываемой первой по по-

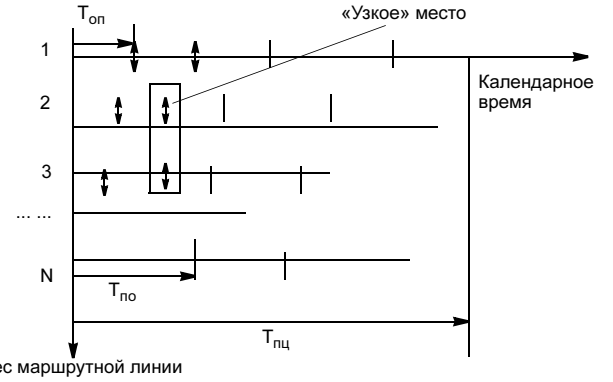


Рис. 1. График загрузки оборудования ($T_{\text{оп}}$ — время операции, $T_{\text{по}}$ — время периода оборота)

рядку на i-м станке; t_{mj} — время обработки одной партии деталей j-го наименования на последующем по ходу маршрутного технологического процесса ($m - i$)-м станке; $t_{\text{пер}.mj}$ — время перерыва между окончанием обработки j-й и началом обработки ($j + 1$)-й партии деталей на ($m - i$)-м станке; $k_{\text{д}}$ — число деталей, закрепленных за данным рабочим местом; n — количество однолинейных маршрутов обработки; l_j — число периодов оборотов партий деталей j-го наименования.

Следовательно, замер производственной мощности через коэффициент загрузки оборудования $k_{\text{з}}$ позволяет выявить группу "лимитирующего" оборудования и предусмотреть графически отсутствие "узких мест" на основе создания комплексных маршрутов обработки с синхронными линиями обработки на графике загрузки оборудования.

В АСТПП предусмотрены три этапа [3].

1. Создание и поддержка базы данных оригинальных технологических процессов номенклатуры выпуска и приведенных маршрутов обработки конструктивно-подобных деталей.

2. Технологическая подготовка производства на основе статического расчета загрузки оборудования объема выпуска.

3. Технологическая подготовка производства на основе динамичных корректировок загрузки и решения вопроса запуска программы.

Схема обобщенного алгоритма программного обеспечения АСТПП приведена на рис. 2. Работа в автоматизированной среде ведется в следующей последовательности.

Блок 1. Ввести нормативные данные маршрутных технологий и их поправочные коэффициенты.

Блок 2. Скорректировать значения трудоемкости операций и показатели количества программы выпуска.

Блок 3. Определить загрузку групп взаимозаменяемого оборудования:

$$\lambda_i = \Sigma A_{ij} K_j,\ i = 1, 2, ..., m.$$

Блок 4. Найти загрузку с учетом коэффициента ρ привидения норм:

$$\lambda_{mi} = \lambda/\rho_i,\ i = 1, 2, ..., m.$$

Блок 5. Подсчитать фонд времени B_1 с учетом коэффициента:

$$\xi = B_i/\lambda_i,\ i = 1, 2, ..., m.$$

Блок 6. Вычислить $k_{\text{з}}$ всех единиц оборудования и их допустимые резервы.

Блок 7. Определить число работающих на объем выпуска.

Блок 8. По логическому условию $\Sigma A_{ij} N_i \geqslant B$ выделить полностью загруженное оборудование.

Блок 9. Сформировать группу "лимитирующего" оборудования.

Блок 10. Конец расчета.

Блок 11. Для объема выпуска установить порядок запуска деталей по режимам: ненапряженный, нормальный, срочный.

Блок 12. Ввести скорректированные нормативные данные маршрутных технологий и их поправочные коэффициенты.

Блок 13. По группе "лимитирующего" оборудования получить на диаграмме график загрузки с нулевой отметки план-графика.

Блок 14. Зафиксировать на нем "узкие места" производственного цикла.

Блок 15. Сформировать скорректированный график без "узких мест".

Блок 16. Рассчитать фактическую загрузку единиц оборудования.

Схема алгоритма статического расчета приведена на рис. 3.

Комплексный подход к планированию технологической подготовки производства на любой необходимой стадии (статический расчет, динамические корректировки, план загрузки оборудования) с использованием автоматизированных систем повышает производительность труда, позволяет получить сбалансированный производственный цикл и проводить анализ загрузки оборудования, необходимого его количества при исполнении производственной программы.

Реализация разработанных алгоритмов АСТПП осуществлена в программе "Excel 2000".

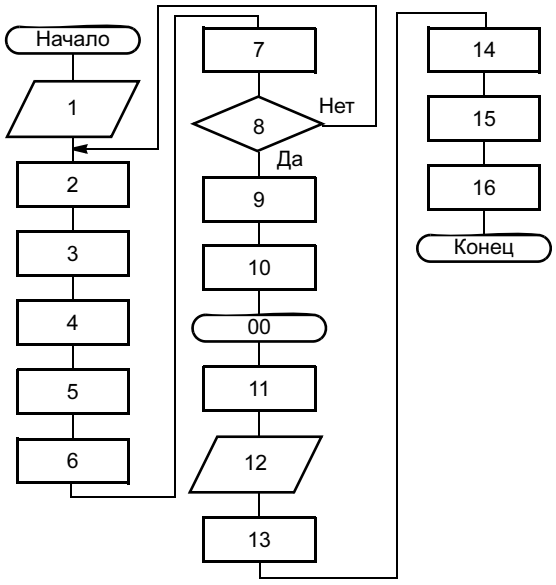


Рис. 2. Схема обобщенного алгоритма фактической загрузки оборудования

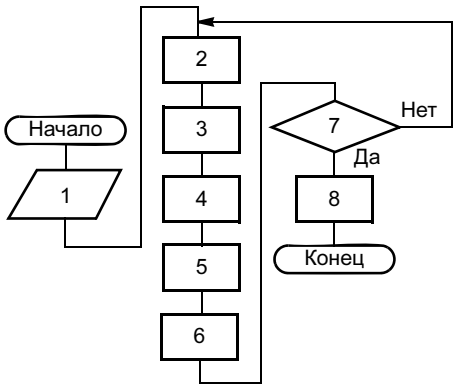


Рис. 3. Схема алгоритма статического расчета (блоки *1—8* — см. рис. 2)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Герасимов Н. И.* Планирование производственной программы машиностроительного предприятия. М.: Экономика, 1972. 151 с.
2. *Куликов А. С.* Обеспечение экономии материалоемкости изделий и энергоемкости технологий в модели оптимальной загрузки производственных мощностей // Экология и ресурсо- и энергосберегающие технологии на предприятиях народного хозяйства. Пенза: Приволжский дом знаний, 2006.
3. *Куликов А. С.* Автоматизированная система технологической подготовки производства деталей в машиностроении // Комплексное обеспечение показателей качества транспортных и технологических машин. Пенза: ПГУ, 2001.

М. С. БОГОЯВЛЕНСКИЙ-ХРАМОВ, инж.
"МАТИ" – РГТУ им. К. Э. Циолковского

Анализ и прогнозирование показателей качества в системах менеджмента качества

Среди основных проблем, стоящих перед машиностроительной отраслью, особое место занимает проблема анализа и предупреждения возникновения несоответствий на различных стадиях жизненного цикла изделий (ЖЦИ). Исследования, позволяющие выявить и устранить возможность появления несоответствий на все более ранних стадиях ЖЦИ, приносят большую экономическую выгоду, что обусловило появление хорошо известного правила "десятикратного роста затрат на устранение дефекта при выявлении его не на данной, а на последующей стадии ЖЦИ".

Мероприятия по предупреждению возникновения несоответствий являются принципиально важными с точки зрения понятия "качество", так как позволяют повышать устойчивость, обеспечивать стабильность процессов.

Все это дает основания считать предупреждающие действия одним из важнейших инструментов менеджмента качества, концептуально важным компонентом результативного менеджмента качества, и в частности современных систем менеджмента качества (СМК).

В стандарте ISO 9001:2000 содержится требование, касающееся наличия и результативного применения документально оформленного механизма управления предупреждающими действиями в качестве необходимого условия для подтверждения соответствия. Но именно при аудитах СМК очень часто выясняется, что на местах существует большая неопределенность в отнесении тех или иных действий к категории предупреждающих.

При этом на большинстве российских предприятий наблюдаются отсутствие или крайне низкий уровень внедрения систем предупреждения несоответствий и высокий уровень несоответствий на выходе процессов и, как следствие, неконкурентоспособность многих видов продукции на внешнем и внутреннем рынках.

Предупреждение несоответствий при разработке и производстве продукции с целью повышения общего уровня качества продукции осуществляется в настоящие время с помощью известных статистических методов, контрольных карт Шухарта и FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) — анализа последствий и причин отказов.

Выбор и внедрение методик, предупреждающих возникновение несоответствий, является важной задачей в СМК.

Указанные обстоятельства свидетельствуют о необходимости разработки методик анализа и предупреждения возникновения несоответствий.

Объединение известных методов, таких как статистический анализ временных рядов, контрольные карты Шухарта и FMEA, дает бóльший эффект по сравнению с отдельными методами.

Интеграция методик возможна при использовании базы данных, основанной на принципах реляционной модели данных и создания единой информационной среды, позволяющих осуществлять анализ и предупреждать возникновение несоответствий на ранних этапах технологического процесса.

Целью метода является выявление потенциальных дефектов изделия и внесение изменений в технологический процесс, которые позволили бы снизить риск потребителя.

При проведении такого анализа формируются требования к конструкции изделия, обеспечивающие безопасность и удовлетворенность потребителя, т. е. осуществляется подготовка исходных данных как для процесса разработки, так и последующего анализа.

Также необходимо осуществить разработку математического аппарата, методик и алгоритмов построения математических моделей, предназначенных для анализа показателей качества для целей оперативного анализа возможных тенденций и последующего предупреждения возникновения несоответствия.

Для этого необходимо решить следующие пять задач: анализ структуры показателей качества и выявление наиболее существенных факторов, влияющих на них; моделирование технологического процесса; построение системы прогнозируемых показателей; анализ показателей качества и выявление трендов; прогнозирование показателей качества.

Анализ и прогнозирование показателей качества осуществляется в пять этапов.

Первый этап — разработка методики выбора формы связи в регрессионных и корреляционных моделях прогноза. Так как здесь в большинстве случаев используется стохастический математический аппарат, этот этап приобретает большую значимость. Одной из предпосылок успешного выбора формы связи является проведение тщательного логико-математического анализа исследуемого процесса.

Второй этап — разработка методов оценки параметров уравнений связи.

Третий этап — разработка прогнозирующего аппарата функций тренда и некоторых способов модификаций их траектории.

Функция тренда является простейшим математическим выражением развития технологических процессов. Однако ее использование в практике прогнозирования

вполне оправдано в тех случаях, когда невозможно обосновать употребление более сложных конструкций прогнозирования или нецелесообразно применять более сложные методы.

Четвертый этап — разработка прогнозирующей регрессионной модели. Достоверность прогноза, полученного при помощи моделей прогнозирования, в большой степени зависит от устойчивости параметров регрессионного уравнения. Поэтому при прогнозировании технологических процессов необходимо провести их предварительное исследование. Методологической основой построения системы моделей является список показателей и установление прямых и обратных связей между ними при построении системы прогнозируемых показателей.

Пятый этап — разработка специальных методов прогнозирования. К специальным методам прогнозирования относятся методы структурного прогнозирования, методы прогнозирования при помощи системы рекуррентных уравнений, авторегрессионные методы прогнозирования.

Для определения альтернативных возможностей изменения структуры технологических процессов в прогнозируемом периоде применяют методы структурного прогнозирования, которые включают анализ совокупности существующих структурных единиц исследуемого объекта и определение новых, пока еще не существующих; анализ взаимосвязей между структурными единицами и определение возможностей совершенствования и роста исследуемого при существующей его структуре; анализ возможных изменений во взаимосвязанных структурных единицах и выявление их влияния на развитие исследуемого явления; прогнозирование тенденций развития существующих и возможных в прогнозируемом периоде структурных единиц, взаимосвязей и пропорций между ними (с использованием методов экстраполяции); окончательная балансировка структуры исследуемого явления.

При вопросе о прогнозировании приходится всегда использовать понятие информации об объекте прогнозирования. Эта информация связана с поведением изучаемого объекта прогнозирования в прошлом и настоящем. Таким образом, ретроспективная информация (прошлый опыт) о прогнозируемом явлении является основой для прогнозирования.

Качество формируется при воздействии многих факторов, однако выделить влияние каждого из них не представляется возможным, поэтому процесс прогнозирования рассматриваемых показателей может рассматриваться как функция времени. При таких условиях задачу прогнозирования следует понимать как экстраполяцию сложившихся во времени тенденций.

Определение закономерностей в поведении прогнозируемого объекта позволяет построить его математическую модель, которая вследствие изоморфизма позволяет исследовать реальные явления путем их математического моделирования. Необходимо заметить, что на выбор модели оказывают влияние цель и задачи прогнозирования, а также величина того интервала (времени, приращения какой-либо другой независимой переменной), на который производится прогнозирование.

С учетом вышесказанного технологический процесс является сложным динамическим явлением, при моделировании и прогнозировании которого возникает ряд проблем.

При этом основные задачи, возникающие в процессе решения задачи прогнозирования возникновения несоответствия, можно разделить на следующие этапы: анализ структуры технологического процесса и выявление наиболее существенных факторов, влияющих на его уровень качества; построение системы прогнозируемых показателей; разработка аппарата математического анализа прогнозируемых показателей; установление причинно-следственных связей между прогнозируемыми показателями и отображаемыми ими факторами; анализ динамики развития возникновения несоответствий и выявление тенденций развития несоответствий; выявление основных закономерностей возникновения несоответствия на основе характеристик этих тенденций; прогнозирование показателей качества.

Важнейшим этапом прогнозирования является выбор метода, который производится на основе анализа требований, предъявляемых к прогнозу. Любая динамическая система обладает той или иной степенью инерционности, что и служит основой прогнозирования, когда тенденции, сложившиеся в прошлом, с определенной степенью уверенности переносятся на будущее. При этом инерционность можно рассматривать двояким образом: как инерционность сложившейся во времени тенденции развития и как инерционность сложившихся в пространстве взаимосвязей отдельных показателей. Поэтому в процессе решения задачи необходимо выделить в качестве прогнозируемых те показатели, которые обладают наибольшей инерционностью с учетом того, что набор этих показателей будет достаточно полным, чтобы всесторонне отражать динамику и состояние технологического процесса. При этом прогнозирование определяет тенденции будущего развития исследуемого явления при условии, что закономерности данного явления, сложившиеся в прошлом, будут существовать и в будущем.

Полученные данные при испытании изделий, представленные в виде временных рядов, т. е. в виде последовательностей измерений, упорядоченных в неслучайные моменты времени, необходимо анализировать для предупреждения возникновения несоответствий.

В отличие от анализа случайных выборок анализ временных рядов основывается на предположении, что последовательные значения в файле данных базы данных наблюдаются через равные промежутки времени (тогда как в других методах не важна и часто не интересна привязка наблюдений ко времени).

Статистические показатели, характеризующие показатели качества, представляют собой измерения некоторых изделий, показатели качества которых меняются во времени, что порождает упорядоченную последовательность, называемую временным рядом. Теоретически такие измерения могут регистрироваться непрерывно, но в конкретном случае они осуществляются через равные промежутки времени и нумеруются аналогично выборке (объему n): $x = \{x1, x2, \ldots xn\}$. Полученный временной ряд является, таким образом, совокупностью наблюдений случайного процесса. Во временных рядах главный интерес представляет описание или моделирование их структуры.

В каждый момент времени (или временной интервал) t значение исследуемой величины, являющейся числовой характеристикой явления, может формироваться под со-

вокупным воздействием большого числа факторов как случайного, так и неслучайного характера.

Изменение условий развития явления ведет к ослаблению действия одних факторов и усилению других и в конечном счете — варьированию изучаемого признака во времени. Характерным для временного ряда $x_{t1}, x_{t2}, ..., x_{tn}$ является то, что порядок в последовательности $t_1, t_2, ..., t_n$ существен для анализа, т. е. время выступает как один из определяющих факторов.

Главными целями проводимого анализа временных рядов являются выбор типа модели, оценка параметров и прогнозирование значений ряда. При этом анализ временных рядов носил интерактивный характер: выбор следующего этапа основывался на полученных результатах, что позволило применять один и тот же метод к разным рядам или разным участкам одного ряда и исследовать с небольшими изменениями спецификации один и тот же ряд.

Исходя из вышесказанного, одной из важнейших задач анализа временных рядов показателей является выявление изменений в поведении ряда. В результате таких исследований могут быть выделены "неблагоприятные" с точки зрения сложившихся тенденций развития периоды времени.

Для анализа поведения имеющихся временных рядов наиболее содержательным представляется использование темпа роста, который характеризует отношение уровня последующего периода к предыдущему и вычисляется как

$$\delta_{i,i-1} = \frac{x_i}{x_{i-1}}. \qquad (1)$$

Введем в рассмотрение величину $(\delta_{i,i-1} - \bar{\delta})^2$, определяющую квадрат отклонения конкретных значений темпов роста от общего среднего. Сравнение полученных значений позволяет выявить периоды нарушения сложившихся тенденций развития.

Соответствующий анализ основных показателей качества позволит прогнозировать и предупреждать возникновение несоответствия.

Характерной особенностью временных рядов рассматриваемых показателей является наличие в них трендов или основных тенденций, сложившихся под влиянием наиболее типичных воздействий. Такой временной ряд можно описать некоторой дискретной функцией времени, которую целесообразно представить в виде суммы некоторой детерминированной функции и случайной составляющей:

$$x[n] = \bar{x}[n] + \zeta[n], \qquad (2)$$

где $n = 1, 2, 3,...$, детерминированная функция $\bar{x}[n]$ является трендом, а случайная функция $\zeta[n]$ отражает воздействие на формирование данного явления множества неучтенных факторов.

С теоретической точки зрения тренд процесса является результатом воздействия на его формирование основных закономерностей причинно-следственного характера, регулирующих данный аспект динамики изменения прогнозируемых показателей. Воздействие же прочих факторов самой разнообразной природы носит в основном стохастический характер и отражается случайной функцией $\zeta[n]$. Однако следует помнить, что, поступая так, мы фактически постулируем модель. Возможно, целесообразно предположить, что тренд обусловлен наличием постоянных факторов, однообразно действующих приблизительно в одном и том же направлении, но то, что это так, и что эффекты от различных воздействующих факторов аддитивны, является предположением и имеет характер гипотезы, от которой мы всегда должны быть готовы отказаться, если наша модель плохо соответствует данным.

Существенным в понятии тренда является "гладкость", что на практике означает желательность его представления непрерывной и дифференцируемой функцией времени. Это позволяет описать тренд полиномом с довольно высокой степенью точности. При таком описании на первый план выходит анализ влияния предыстории на формирование конкретного значения изучаемого показателя.

Анализ временных рядов показателей качества указывает на существование устойчивых тенденций (трендов) развития рассматриваемых процессов.

В процессе анализа показателей качества были выявлены временные интервалы, характеризующиеся нарушением общих тенденций развития. Представляется целесообразным проведение сравнительного анализа технологического процесса за данные периоды с целью выявления причин возникновения несоответствий.

Прогнозирование имеет смысл только в том случае, если его результаты помогут предупреждать возникновение несоответствий. Если при анализе прогноза пришли к выводу, что лучше всего ничего не менять, то это тоже будет решением. Чтобы полученные с таким трудом прогнозы приносили пользу компании, лица, принимающие решения, должны хотя бы в общих чертах понимать как саму модель, так и процесс прогнозирования в целом.

В процессе планирования можно обнаружить, что факторы, которым придавалось большое значение, никак не участвуют в модели. В таком случае необходимо проверить эти регрессоры на изменчивость. При планировании необходимо постараться их варьировать для начала в небольшом диапазоне, а затем так, чтобы они приносили максимальную пользу компании. Главное помнить, что не только результаты прогноза влияют на процесс принятия решений, но и принятые решениях в свою очередь могут радикальным образом изменить прогноз.

Модели — помимо того что они дают диапазон будущих значений переменной — выполняют также важную стратегическую функцию, предоставляя целый спектр различных вариантов развития в будущем, предупреждая менеджера по качеству о возможных последствиях того или иного развития события.

В результате проведения статистической обработки данных можно сделать вывод, что предложенные алгоритмы позволяют отслеживать динамику основных показателей качества исследуемых объектов и осуществлять их прогнозирование.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гельфанд И. М.* Лекции по линейной алгебре. М.: МЦНМО, 1998.
2. *Фихтенгольц Г. М.* Курс дифференциального и интегрального исчисления. М.: Физматлит, 2001.
3. *Гнеденко Б. В.* Курс теории вероятностей. М.: Эдиториал УРСС, 2004.
4. *Крамер Г.* Математические методы статистики. Ижевск: Регулярная и хаотическая динамика, 2003.
5. *Уиллкс С.* Математическая статистика. М.: Наука, 1967.

Содержание зарубежных журналов[1]

Modern Machine Shop
(N 8, Vol. 78, 2006, США)

Zelinski P. Испытание режущих инструментов, с. 12.

Рассматриваются факторы, влияющие на решение о проведении испытаний, и экономические аспекты подобных испытаний с точки зрения стоимости станко-часа и затрат рабочего времени. Указывается на то, что затраты на испытания необходимо относить на совокупную стоимость инструментов.

Zelinski P. Виды разрушения режущих инструментов, с. 80—86, ил. 7.

Вид разрушения режущего инструмента может подсказать, что необходимо изменить в процессе обработки. Подробно рассмотрены основные факторы, влияющие на разрушение режущих инструментов: абразивное истирание, тепловые и механические перегрузки и ударные нагрузки, химическое взаимодействие с обрабатываемым материалом и пути их устранения. Приведены виды разрушений от вышеуказанных факторов.

Zelinski P. Инструментальные материалы, с. 90—92, ил. 3.

Описаны свойства, структура и технологические возможности керметов — инструментального материала, состоящего из твердого сплава (карбида вольфрама или карбонитрида титана) и металлической связки. В последнее время существенно увеличилась вязкость керметов, прочность которых стала сопоставима с прочностью на излом сплава Р15, что позволяет использовать эти материалы не только для окончательной обработки с глубиной резания не более 1,5 мм, но и для обычной обработки с глубиной резания до 3,0 мм.

Нарезание резьбы метчиками, с. 136, ил. 1.

Сообщается о новой системе FlexArm, позволяющей существенно снизить потери времени и повысить производительность на 20 % за счет устранения операции по нарезанию резьбы метчиком на дорогостоящем станке с ЧПУ типа CNC. Операции по нарезанию резьбы диаметром 15—50 мм могут быть возложены на оператора, в то время как на станке производится сверление отверстий и другие сложные операции.

Шлифовальный станок с ЧПУ, с. 163.

Фирма DCM Tech. Inc. разработала станок IG 130 SD для обработки прецизионных медицинских деталей. Отработанные параметры закладываются в память для последующего использования. На нем можно шлифовать ортопедические изделия, пьезокерамические элементы для датчиков из коррозионно-стойкой стали, а также компоненты штампов и форм.

Вертикальный многоцелевой станок для обработки медицинских деталей, с. 166, 167, ил. 1.

Фирмой Methods Machine Tools создан станок RoboDrill E для изготовления деталей медицинских устройств, в числе которых берцовые опорные элементы, корпуса клапанов, зондов, трубчатых и сплошных игл, втулок, имплантатов, стоматологических инструментов, экранов, выполненных из титана, закаленных инструментальных сталей и технических пластиков. Станок позволяет производить фрезерование и сверление с высокими скоростями резания, нарезание резьбы метчиками, высокоскоростные операции по удалению заусенцев.

Твердосплавные режущие инструменты, с. 169.

Фирма Harvey Tool Co. предлагает специальные твердосплавные инструменты, предназначенные для обработки деталей медицинской промышленности из композитов, коррозионно-стойкой стали и титана, в частности искусственных суставов и сердечных клапанов.

Новая система подачи прутков на токарных станках, с. 169, 170, ил. 1.

Поддержание центрированного положения прутка при его вращении в процессе прецизионной обработки — необходимое условие при изготовлении ортопедических винтов, зубных имплантатов и компонентов дефибрилляторов. Применительно к этим требованиям фирма LNS America разработала автоматическую систему Express для их подачи на прутковых токарных автоматах с фиксированной передачей бабкой. Время полной смены прутка при этом не превышает 8 мин.

Прутковые заготовки для обработки с высокой точностью, с. 171.

К обработке деталей для медицинских целей предъявляют особо высокие требования точности. Фирма Boston Centeiless поставляет заготовки различных типов из материалов 303SS, 440A, 17-4 PH, титана и специальных сплавов для медицинской промышленности, обработанных с точностью до 2 мкм. Из таких заготовок могут быть из-

[1] Раздел подготовлен инж. Г. С. Потаповой (по вопросам получения материалов из зарубежных журналов обращаться по тел./факсу: (495) 611 21 37, e-mail: stankoinform@mail.ru).

готовлены винты для скрепления костей, сверла, позвонки, зубные имплантаты, фиксирующие средства и др.

Прутковая заготовка для высокоточной обработки, с. 171.

Качественная прутковая заготовка позволяет снизить время производственного цикла и, следовательно, повысить производительность, поэтому для нужд медицинской промышленности требуются высокоточные прутковые заготовки. Фирма Boston Centerless (США) поставляет заготовки различных типов с допусками до 0,001 мм для изготовления прецизионных винтов, сверл, позвоночных и зубных имплантатов и фиксирующих устройств из титана и различных специальных сплавов.

Неподвижная и подвижная передние бабки на одном станке, с. 177, 178.

Сообщается о разработке фирмой Index станков Traub TNL с подвижной передней бабкой для высокоскоростного и высокоточного изготовления крепежных и других мелких деталей для медицинской промышленности, например зубных имплантатов, винтов для крепления кости. Токарные станки серии TNL 12/26/K оснащены подвижными и неподвижными передними бабками, имеют револьверную головку с 12 позициями и основной и противолежащий шпиндели.

Сверлильный станок для медицинской промышленности, с. 180.

Фирма Minitool предлагает сверлильный станок H для сверления мелких отверстий диаметром от 0,025 до 0,050 мм в деталях из стали, керамики, пластика и др. По данным фирмы, незначительное отклонение от цилиндричности и высокое качество поверхности обрабатываемого отверстия обеспечивают специальным устройством для закрепления и направления сверла и высокоточным устройством подачи инструмента.

Миниатюрные концевые фрезы, с. 180.

Фирма Kennametal предлагает миниатюрные твердосплавные концевые фрезы Vision Plus, обладающие большой стойкостью при обработке деталей медицинского назначения из вязких коррозионно-стойких сталей и титана с высокой подачей. Для повышения точности обработки и уменьшения отходов относительно дорогого материала фрезы имеют специфическую параболическую форму стружечных канавок.

Обрабатывающий центр, с. 180.

Описывается обрабатывающий центр UCP 600 Vario фирмы Micron Bostomatic для обработки по пяти осям деталей для медицинской промышленности. Центр оснащен устройством смены режущих инструментов емкостью от 100 до 220 инструментов и семипозиционным устройством для смены поддонов с обрабатываемыми деталями. Центр выпускается со шпиндельными головками трех типов с частотой вращения 12 000, 20 000 и 42 000 мин$^{-1}$ и круглым столом с углом качания от 115 до 30°.

Повышение технологических возможностей токарных станков, с. 181, ил. 1.

Токарные станки с ЧПУ серии NL, изготовленные фирмой Mori Seiki (США), широко применяют в медицинской промышленности для изготовления компонентов суставов из титана и коррозионно-стойких сталей. Теперь эти станки становятся подобно многоцелевым, так как на них можно производить операции фрезерования с удовлетворением высоких требований, предъявляемых к таким деталям. Двигатель для привода фрезы размещен в револьверной головке, что снижает потери на передачу, уровень вибраций (на 50 %) и время на ускорение шпинделя с фрезой.

Электроэрозионная обработка деталей для медицинской промышленности, с. 182, ил. 1.

Сообщается о новом электроэрозионном станке AQ300L фирмы Sodick, являющимся многоцелевым станком для изготовления медицинских инструментов и имплантатов. В станке предусмотрены вспомогательная ось вращения, позволяющая индексировать и вращать обрабатываемую деталь, автоматическая система подачи проволочного электрода, приводы с линейными двигателями и антиэлектролизная система. Перемещения по осям X, Y, Z соответственно равны 300, 100 и 200 мм. Площадь пола, занимаемая станком, равна 1,35 × 2,4 м.

Специальная инструментальная оснастка, с. 182.

Фирма Rego-Fix Tool предлагает большой ассортимент инструментальной оснастки, предназначенной для обработки мелких деталей медицинской промышленности, в числе которых цанговые патроны для закрепления режущих инструментов диаметром от 0,2 до 34 мм, обеспечивающие большое усилие зажима, сопоставимое с усилием зажима гидравлических патронов. Цанговые патроны обладают эффектом демпфирования, что способствует улучшению качества обработанной поверхности.

Обработка деталей сложного профиля с одного установа, с. 183.

Сообщается о созданном фирмой Kitamura Machinery (США) станке Mytrunmon, обеспечивающем точность и повторяемость позиционирования соответственно ±0,01 и ±0,05 мм, причем наряду с высокой точностью обеспечивается высокое качество поверхности и экономичная обработка сложных деталей при минимальных затратах на инструментальную оснастку. Станок можно применять в ортопедическом производстве, производстве фиксируемых имплантатов, хирургии, стоматологии и других областях медицинской промышленности.

American Machinist
(N 2, Vol. 150, 2006, США)

Технология подачи материала в системах очистки металлических прутков, с. 16, ил. 1.

Сообщается о разработанной фирмой Hydromat технологии Edge Technologies с использованием усовершенствованных устройств, осуществляющих подачу стержней и других деталей на линиях очистки, созданных этой же фирмой. Устройство с наименьшими габаритными размерами именуется "Minutement" и служит для подачи прутков, стержней диаметром до 20 мм.

Станки для мелкосерийного производства, с. 53. ил. 1.

Фирма Southwestern Undustries (США) выпустила каталог, в котором приведены характеристики изготовляемых компанией токарных и фрезерных станков для мелкосерийного и единичного производства, в том числе станков с ЧПУ типа CNC. Рассмотрено применение CNC-технологии, когда машины обслуживаются квалифицированными операторами-станочниками при изготовлении единичных изделий или изделий, поступающих в производство небольшими партиями.

(N 3, Vol. 151, 2007, США)

Bates Ch. Модернизация инструментального хозяйства, с. 30—32, 33, ил. 3.

Описывается опыт фирмы K&L Microwave по оптимизации производства, для работы которого необходимо каждую неделю переналаживать более 200 станков. За счет применения до 30 универсальных стандартных программ наладки станка, включающих данные о необходимых режущих инструментах, месте нахождения требуемого инструмента и заполнении гнезд инструментального магазина, время наладки станка сократилось до 5 мин (в некоторых случаях до 3 мин).

Bates Ch. Прутковые токарные автоматы, с. 42—43.

Приведены технические характеристики семи моделей прутковых токарных станков, одновременно работающих двумя, тремя или четырьмя инструментами. Все станки имеют подвижную переднюю бабку и второй шпиндель, противоположный главному шпинделю. Частота вращения шпинделя составляет до 18 000 мин$^{-1}$ в зависимости от модели станка.

Benes J. Охлаждающие жидкости, с. 48, 50—51, ил. 1.

Традиционные СОЖ на основе масла представляют сложную смесь масел, моющих средств и других компонентов, которые могут быть потенциально токсичными. Сообщается о новых разработках в области охлаждения, осуществляемых с целью создания СОЖ, стойких против биологического и химического воздействий, обладающих большим сроком службы и более безопасных для оператора и окружающей среды. Описаны новые полимерные присадки, существенно уменьшающие интенсивность образования масляного тумана при применении СОЖ.

Bates Ch. Применение фрезерно-расточных станков, с. 54, ил. 2.

Описывается опыт фирмы Energy Equipment по применению фрезерно-расточных станков RT1250 для обработки клапанных коробок высокого давления, представляющих детали призматической формы размером 610 × 610 × 914 мм из стали 4130. Обработка включает в себя фрезерование плоскостей фрезой диаметром 203 мм при глубине резания до 9,5 мм, сверление и растачивание отверстий диаметром 178 мм, а также фрезерование кольцевых канавок и обработку гнезд для уплотнений.

Обработка водоабразивной струей, с. 56—57, ил. 1.

Описывается применение устройства водоабразивной резки Wardjet Z-613 фирмы Wardjet Inc. для обработки отверстий в композиционных слоистых материалах без расслоения последних. Осуществляется технология комбинированной последовательной обработки отверстия с помощью пневматической сверлильной и водоабразивной головок.

Cutting Tool Engineering
(N 2, Vol. 58, 2006, США)

Абразивные ленты, с. 14, ил. 1.

Фирма Saint-Gobain Abrasives предлагает абразивные ленты Norton SG BLAZE R980 шириной 1321 мм и зернистостью от 24 до 80. При работе ленты каждое керамическое режущее зерно непрерывно выкрошивается вдоль субмикронных дефектов кристаллической структуры, благодаря чему все время возникают новые режущие кромки.

Chaplin R. Геометрия режущих инструментов, с. 18, ил. 1.

Анализируется влияние геометрии режущих инструментов на процесс резания и образование стружки, а также приводятся некоторые технологические рекомендации. Например, отрицательный передний угол (для черновой обработки, прерывистого резания и обработки по корке) обеспечивает наиболее прочную режущую кромку, однако в этом случае необходима максимальная сила для скалывания стружки. При положительном переднем угле образуется более тонкая стружка, которая непосредственно отводится от обрабатываемой детали, что уменьшает силу резания.

Kennedy B. Стратегия, тактика и инструменты — составляющие высокоточной обработки, с. 20—22, ил. 1.

На заводе фирмы Puget Sound Precision Inc. (США) изготовляют прототипы и инструменты высокой точности, в том числе хирургические, для нужд разных отраслей промышленности. Подробно описана технология и приведе-

ны режимы резания. Например, инструмент из коррозионно-стойкой стали 17-4 диаметром 10 мм и длиной 210 мм, твердостью 41—43 HRC обтачивали на автомате продольного течения Tsugami BS20C Mark III CNC. Затем заготовку переносили на вертикальный обрабатывающий центр Fadal 4020, на котором обрабатывали плоские поверхности обеих сторон детали. Завершающую операцию выполняли на фрезерном станке Bridgeport, имеющем поворотную шпиндельную головку. Такая комбинация позволила упростить программирование и обеспечить эффективность производства.

(N 3, Vol. 58, 2006, США)

Обрабатывающий центр будущего, с. 44.

Фирма Wendt предлагает обрабатывающий центр Wac 735 Centro с ЧПУ, имеющий пять основных и две дополнительных оси, что расширяет технологические возможности и позволяет использовать любые режущие пластины. Центр имеет встроенную центрирующую призму с автоматической регулировкой высоты для прецизионного механического центрирования, устройство автоматической компенсации изменения размеров заготовки и зажимное устройство, поворачивающееся на 360° вокруг своей оси и вокруг оси обрабатываемой детали.

Woods S. Обработка резанием с малым количеством СОЖ, с. 58, 60—64, ил. 6.

Обработка с минимальным количеством СОЖ известна уже свыше 50 лет, однако все еще не стала общепринятой практикой, несмотря на существенные преимущества по сравнению с обычными методами обработки резанием. Обработка с малым количеством СОЖ позволяет использовать растительное масло, что устраняет проблемы, связанные с переработкой и утилизацией отходов. Также уменьшается опасность повреждения кожи человека. Рассматриваются различные системы и схемы охлаждения, а также инструменты специальной конструкции.

Richter A. Электроэрозионные вырезные станки для крупных заготовок, с. 66—70, ил. 2.

Рассматриваются проволочно-вырезные станки разных фирм для обработки крупногабаритных деталей массой более 1 т и размером свыше 1029 × 735 × 490 мм. Приведены их технические характеристики и возможности. Например, на станке U86 фирмы Makino Inc. (США) с перемещениями по осям *X*, *Y* и *Z* обрабатывают детали размером до 1220 × 900 мм, причем толщина заготовки составляет 500 мм, а максимальная масса — 3000 кг. Описывается безлюдная технология обработки крупногабаритных деталей, а также оборудование, специально предназначенное для таких станков, например, барабаны, подающие проволоку, которые должны быть большими. Фирма Makino использует редко заменяемый 20-килограммовый барабан, а компания Accute X EDM применяет 45-килограммовый барабан, установленный за станком.

DIMA (Die Maschine)
(N 4, Vol. 60, 2006, Германия)

Оптимизация процессов механической обработки в серийном производстве, с. 64, 65, ил. 2.

Изложен опыт фирмы Rautenbach-Guss (Германия), изготовляющей продукцию для автомобильной и других отраслей промышленности. Фирма следует тенденции сокращения длительности производственных циклов и затрат. Для достижения этих целей фирма применяет новейшую технологию, высокоэффективное оборудование и моделирование производственных процессов. В частности, эти технологические достижения применены к обработке головок цилиндров для автомобильных двигателей. Показано, что усовершенствованная технология позволила существенно сократить время на обработку, что обеспечило экономию в 10 %. Приведены краткие сведения о применяемом оборудовании.

European Tool and Mould Making
(N 1 (февраль), Vol. 8, 2006)

Компактный вертикальный обрабатывающий центр для опытного производства инструмента и моделей, с. 24, ил. 1.

Рассматривается применение станков Mini Mill 560 и 1510 VMC компании XYZ Machine Tool Ltd. Отмечается возможность эксплуатации станков по безлюдной технологии при расширении размеров рабочих объемов до 560 × 400 × 500 и 1510 × 604 мм по осям *X* и *Y*. Указывается на использование системы ЧПУ Heidenhain i TN530CNC, позволяющей обрабатывать сложные поверхности со скоростью 4—5 м/мин при частоте вращения шпинделя до 8 000 об/мин.

Industrial Diamond Review
(N 3, 2006, Великобритания)

Denkena B. et al. Технология изготовления износостойких керамических имплантатов, с. 54, ил. 4.

Проанализированы проблемы, связанные с необходимостью удлинения срока службы имплантатов, в частности керамических, широко применяемых в эндопротезах. Проблемы могут быть решены путем надлежащей обработки основных функциональных поверхностей имплантатов. Разработана технология автоматической обработки поверхностей с глубокими впадинами, которая основана на шлифовании по пяти осям, что позволяет эффективно обрабатывать поверхности любой сложности. Подробно описан новый технологический процесс, предусматривающий черновое шлифование, шлифование по пяти осям и полирование. Изложены также результаты исследований особенностей этого процесса и факторы, влияющие на его эффективность. Сообщается о применяемом оборудовании и инструментах.

7-я Международная специализированная выставка "Мир инструмента–2007"

С 27 по 30 марта 2007 г. в КВЦ "Сокольники" (Москва) проходила 7-я Международная специализированная выставка инструмента для различных отраслей промышленности, включая инструмент для холодной обработки давлением смазочно-охлаждающие жидкости; специализированный инструмент и сварочное оборудование.

Выставка располагалась на площади более 2000 м^2, свою продукцию на ней демонстрировали более 100 ведущих компаний из многих стран, в том числе из России.

Далее приведено краткое описание некоторых экспонатов, демонстрировавшихся на выставке, и предложений компаний-разработчиков, вызвавших наибольший интерес у специалистов.

Савеловский машиностроительный завод (г. Кимры Тверской обл.) продемонстрировал и предложил потребителям следующую продукцию.

Токарный станок ТПК-125А1-1 с ЧПУ высокой точности (рис. 1) для патронной и центровой обработки малогабаритных деталей с большим числом проходов и сложного профиля из конструкционных сталей и сплавов. На станке можно производить все виды токарной обработки, включая нарезание резьбы. Наличие на станке револьверной головки позволяет значительно расширить его технологические возможности, увеличить производительность, повысить качество обрабатываемых деталей. В станке предусмотрен механизм захвата прутка, что позволяет обрабатывать детали из пруткового материала диаметром до 25 мм и длиной до 800 мм. На суппорте станка смонтированы высокоточные линейные направляющие, пневмопатрон, высокоточные шариковые винтовые пары с арочным профилем. Станок оснащен агрегатом автоматизированной подачи прутка (вместимостью 25 шт.), механизмом приема готовой детали, а также устройством для лазерно-плазменного полирования, финишного процесса после механической токарной обработки. Максимальные диаметр устанавливаемой заготовки 125 мм, длина обрабатываемой поверхности 180 мм, пределы рабочих подач суппорта 1—6000 мм/мин со скоростью 8000 мм/мин, частота вращения шпинделя 50—4000 мин$^{-1}$. На станке можно установить шесть инструментов. Параметр шероховатости поверхностей обрабатываемых стальных деталей *Ra* = 1,25 мкм, цветных сплавов (алмазным резцом) — 0,32 мкм. Суммарная мощность электродвигателей 9,04 кВт. Габаритные размеры станка 1680 × 1040 × 1630 мм, масса 1,86 т.

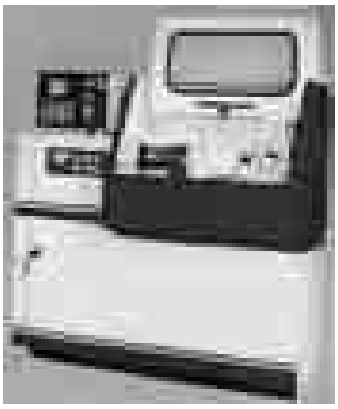


Рис. 1. Токарный станок ТПК-125А1-1

Специализированный многофункциональный фрезерный станок УФ-320 для широкого применения в условиях индивидуального и серийного производства. На станке возможна обработка плоских и фасонных поверхностей цилиндрическими, торцовыми и концевыми фрезами. Технические показатели станка обеспечивают высокопроизводительную обработку стали, чугуна, цветных металлов с применением быстрорежущего и твердосплавного инструмента. Станок оснащен вертикальным поворотным шпинделем, позволяющим применять горизонтальную фрезерную насадку и горизонтальный шпиндель, что значительно расширяет его технологические возможности. Смазка на станке осуществляется от централизованных систем. Рабочая поверхность стола 1250 × 320 мм. Максимальное перемещение вертикального шпинделя 80 мм. Частота вращения вертикального шпинделя 45—2000 мин$^{-1}$. Число ступеней рабочих подач стола 22. Скорость перемещения стола в продольном и поперечном направлениях 4000 мм/мин, в вертикальном направлении — 1333 мм/мин. Суммарная мощность электродвигателей 10,33 кВт. Габаритные размеры станка 2275 × 2240 × 2015 мм, масса 3,25 т.

У*стройство числового программного управления "FLEX NC"* (рис.2) — отечественная разработка с использованием современной зарубежной элементной базы с открытой архитектурой класса "PC-based". Это высокоточное устройство программного управления (технологическим оборудованием всех типов в трех-, четырех- и пятикоординатном исполнении), разработанное на базе контроллера движения. Встроенный контроллер PMAC управляет движением (до 32 осей) и электроавтоматикой (до 2048 входов/выходов). В качестве датчика обратной связи применены круговые энкодеры и оптические линейки. Основной принцип построения системы управления устройства — применение ПК с программируемым многоосевым контроллером движения PMAC.

Малогабаритный пресс МПС-30 (рис. 3) для испытания образцов сварных стыков на статический изгиб

Рис. 2. Устройство числового программного управления "FLEX NC"

Рис. 3. Малогабаритный пресс МПС-30

до их разрушения с автоматической регистрацией значения разрушающего усилия и деформации. Максимальные рабочее усилие пресса 3000 кН, рабочее давление 80 МПа, длина испытываемого образца 1200 мм. Габаритные размеры пресса 2000 × 560 × 1585 мм, гидропривода — 640 × 490 × 1100 мм, масса 1,58 т.

Малогабаритный пресс ПМ-100 (переносной) для соединения линий электропередач в труднодоступных местах. Пресс осуществляет соединение методом опрессовки стальных, алюминиевых и медных проводов. Он снабжен сменными круглыми и шестигранными обжимными матрицами, ножами, наковальней для рихтовки и штамповки различных изделий. Максимальное рабочее усилие пресса 1000 кН, рабочий ход штока 45 мм, максимальный диаметр перекусываемого провода 35 мм, габаритные размеры пресса 610 × 450 × 470 мм, масса 70 кг.

Конаковский завод механизированного инструмента (г. Конаково Тверской обл.) представил *радиально-шлифовальную ручную машину ИП-2014Б* для зачистки сварных швов стального и чугунного литья и металлоконструкций. Диаметр абразивного круга 150 мм, частота его вращения 40 мин$^{-1}$, номинальная мощность 1,275 кВт. Габаритные размеры машины 590 × 164 × 130 мм, масса без съемного инструмента и защитного кожуха 4,2 кг.

ЗАО "Межотраслевой инновационный дом автогенного сварочного оборудования и технологий" (Москва) продемонстрировало различное газоэлектросварочное оборудование.

Резак кислородно-пропановый "РЗР-3" для ручной и разделительной кислородной резки углеродистых и низколегированных сталей с применением пропана. Толщина разрезаемого металла 300—800 мм. Рабочее давление кислорода 0,50—0,75 МПа, пропана 0,05 МПа. Длина резака 950 мм, масса 8,4 кг.

Резак машинный РМ-2/РМ-3 для машинной разделительной кислородной резки углеродистых и низколегированных сталей. Толщина разрезаемой стали до 300 мм. Применяемый горючий газ — ацетилен или пропан. Длина резака 332 мм, масса 0,92 кг.

Установку УКФР-8М для ручной кислородно-флюсовой резки коррозионно-стойкой стали, чугуна, бетона, аллюминия и сплавов цветных металлов и кислородной резки низколегированных сталей толщиной 3—500 мм. Максимальный расход кислорода при работе установки 40—60 м^3/ч, флюса 0,6—0,8 кг/мин. Скорость резки стали 50—70, коррозионно-стойкой стали 80—100, чугуна 40—60, алюминия 50—70 мм/мин.

Машину переносную "Орбита-БМ" для кислородной резки стальных труб в полевых условиях. Диаметр разрезаемых труб 530—1420 мм, максимальные толщина разрезаемого металла 75 мм, расход на один резак кислорода 12 м^3/ч, пропана — 0,55 м^3/ч. Потребляемая мощность машины 50 Вт, питающее напряжение машины 24 В, блока питания 220 В. Машина оснащена двумя резаками, скорость их перемещения 100—1200 мм/мин.

ЗАО "Межотраслевой инновационный дом автоматического сварочного оборудования и технологий демонстрировало и предложило потребителям сварочное и другое оборудование, разработанное за рубежом.

Инверторную воздушно-плазменную установку CUT30 для резки коррозионно-стойких сталей, меди, алюминия и т. п. Скорость резки в 1,8 раза выше, чем при кислородной резке и сварке. По словам разработчиков, легко и экономично разрезаются толстые металлические детали. Питающее напряжение установки 230 (± 10 %) В, потребляемая мощность 4 кВт, диапазон сварочного тока 10—30 А, кпд 85 %, способ возбуждения дуги — контактный при расходе воздуха 0,17 м^3/мин. Габаритные размеры установки 371 × 155 × 295 мм, масса 8 кг. Максимальная толщина разрезаемого металла 8 мм.

Установку LGK-160 для воздушно-плазменной резки по технологии IGBT, позволяющей осуществлять тонкое регулирование цепи обратной связи при резке. Ток резки регулируется от 20 до 160 А, что позволяет резать различные стали, включая легированные, а также цветные металлы. Плазменная дуга возникает в короткий промежуток времени, что позволяет разрезать окрашенный и ржавый металл. Напряжение питающей сети установки 380 В, установка оснащена блоком защиты от короткого замыкания, перегрева, перенапряжения и автоматической компенсации напряжения и давления газа. Потребляемая мощность установки 30 кВт, коэффициент мощности 0,93cosφ, габаритные размеры 670 × 330 ×590 мм, масса 53 кг.

Сварочный трансформатор PARVA165E для ручной сварки углеродистых и низколегированных сталей штучными электродами, оснащенный устройством автоматического отключения сети питания в случае неправильной эксплуатации. Трансформатор имеет пониженное значение напряжения холостого хода (44—48 В), что обеспечивает технику безопасности в соответствии с требованиями Евростандарта. Питающее напряжение трансформатора 230 В, потребляемая мощность до 5 кВт, пределы регулирования сварочного тока 40—160 А, габаритные размеры 390 × 210 × 280 мм, масса 16 кг.

Сварочный инверторный выпрямитель MOS-95E (рис. 4) для сварки углеродистых и низколегированных сталей, меди, никеля толщиной от 0,5 мм покрытыми электродами. Сварку выполняют на прямой или обратной полярности. Функция "горячий старт" облегчает первичное возбуждение сварочной дуги. Функция "антиприлипитание" помогает избежать перегревания электрода. Функция "APC FORCE" осуществляет стабилизацию сварочной дуги. Питающее напряжение сети 230 В, ток 10 А, потребляемая мощность 1,5 кВт, коэффициент мощности 0,8cosφ, пределы регулирования сварочного тока 5—80 А, диаметр сварочного электрода 1,6—2,5 мм. Габаритные размеры выпрямителя 270 × 100 × 140 мм, масса 2,3 кг.

Сварочный полуавтомат DECAMIG 5250 для механизированной сварки углеродистых, низкоуглеродистых и низколегированных сталей и алюминия в защитных газах. Полуавтомат поддерживает двухтактный режим работы механизма подачи сварочной проволоки и элек-

Рис. 4. Сварочный инверторный выпрямитель MOS-95E

трозаклепочный режим цикла сварки. Имеется возможность сварки двух листов металла внахлест (сварочными точками), когда доступ возможен только с одной стороны. Регулируемая "растяжка дуги" уменьшает прилипание сварочной проволоки к свариваемому изделию, регулируемый "горячий старт" дает возможность плавного поджига сварочной дуги. Потребляемая мощность полуавтомата 6 кВт, габаритные размеры 850 × 380 × 750 мм, масса 59 кг.

Универсальную установку DECATIG 200E для ручной аргонодуговой сварки углеродистых, легированных сталей, меди и алюминия, оснащенную высокочастотным осциллятором, который обеспечивает бесконтактный поджиг сварочной дуги. Регулирование переменного сварочного тока осуществляется в пределах 20—200 А, постоянного тока — 15—180 А. Габаритные размеры установки 890 × 460 × 800 мм, масса 100 кг.

Полуавтомат ПДУ-306 У3 с выпрямителем ВДГ-306 У3 для механизированной дуговой MIG-, MAG-сварки в защитных газах. Конструктивно аппарат состоит из выпрямителя и механизма подачи сварочной проволоки. Полуавтомат может работать в тяжелых условиях эксплуатации. Его питающее напряжение 380 В, номинальный сварочный ток 315 А, регулирование сварочного тока плавное, потребляемая мощность не более 18 кВт. Диаметр сварочной проволоки 0,8—1,4 мм, скорость ее подачи до 12 м/мин. Габаритные размеры полуавтомата 460 × 180 × 270 мм, масса 15 кг.

Многопостовой сварочный выпрямитель ВДМ-1203 (рис. 5) для комплектации сварочных постов ручной дуговой сварки штучными электродами (ММА-ДС) постоянным током углеродистых и низколегированных сталей; для дуговой сварки в тяжелых условиях эксплуатации (высокая температура окружающей среды, повышенная запыленность, повышенная интенсивность эксплуатации). Питающее напряжение сети 380 В, номинальный сварочный ток 1250 А при ПН = 100 %, число постов не более 8 шт., потребляемая мощность не более 96 кВт. Габаритные размеры выпрямителя 1100 × 620 × 850 мм, масса 350 кг.

Универсальную установку УДГУ-506 для аргонодуговой сварки постоянным и переменным током неплавящимся вольфрамовым электродом различных металлов и сплавов, включая алюминий и его сплавы. Регулирование тока плавное при помощи электронного блока. Зажигание и стабилизация дуги осуществляется встроенным возбудителем-стабилизатором. Имеется режим ручной дуговой сварки плавящимся металлическим электродом. Охлаждение горелки принудительное, жидкостное. Напряжение питающей сети установки 380 В, номинальный сварочный ток при ПН = 60 % составляет 500 А, пределы регулирования рабочего напряжения 16—36 В, потребляемая мощность не более 35 кВт. Габаритные размеры установки 1100 × 600 × 850 мм, масса 180 кг.

ООО "ИМАГ" (Москва) предложило потребителям приборы и инструмент, разработанные в разных странах.

Мультиинтерфейсный тестер D2071 (рис. 6) для определения неисправностей в цифровых абонентских линиях DSL. Прибор позволяет тестировать цифровые системы передачи стандартов ShDSL, ADSL и ISDN. Под каждую технологию разработан соответствующий модуль, подсоединенный к базовому блоку D2071 через специальный разъем. Каждый сменный модуль содержит тесты, предназначенные только для определенной технологии. Программное обеспечение тестера "PC108 for Windows" анализирует данные и управляет прибором дистанционно. Сочетание таких качеств, как небольшая масса, высокая технологичность измерений, всепогодное исполнение и возможность оперативной смены модулей, выгодно отличает прибор от аналогичного оборудования. Базовый блок выполнен в антиударном корпусе. Жидкокристаллический дисплей имеет широкие графические возможности, хорошо продуманную систему меню. Результаты измерений можно распечатать, подключив к прибору принтер.

Пистолет WG-350 для монтажа провода диаметром 0,20—0,65 мм. Корпус пистолета металлический. При одном нажатии на рукоятку пистолет выполняет 10 оборотов, что обеспечивает навивку провода за один прием.

Инструмент PTX для монтажа (демонтажа) провода диаметром 0,25—1,00 мм. Направление вращения инструмента (реверс) изменяется переключателем, расположенным на тыльной стороне пистолета, что предотвращает его случайное переключение. Конструкция пистолета хорошо сбалансирована, он оснащен мощным редуктором планетарного типа. Питание инструмента от сети переменного тока напряжением 230 В или аккумулятора напряжением 3,6 В.

ООО "Орион-консалтинг" (Москва) демонстрировало технологию и оборудование для приварки метизов, разработанные в Германии.

Приварка метизов конденсаторным разрядом. В соответствии с этой технологией сварки (рис. 7) энергия,

Рис. 5. Многопостовой сварочный выпрямитель ВДМ-1203

Рис. 6. Мультиинтерфейсный тестер Д2071

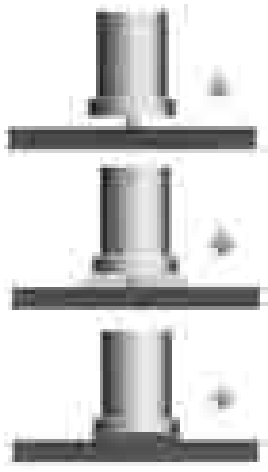


Рис. 7. Технология приварки метизов конденсаторным разрядом

накопленная в конденсаторной батарее, разряжается сквозь контактный кончик сварочного метиза за 0,001—0,003 с. При этом применение защитного газа или керамических наконечников (колец) не требуется. Приварка происходит следующим образом: кончик метиза касается обрабатываемой детали, затем включается конденсаторный разряд; зажженная дуга расплавляет контактные зоны метиза и рабочую поверхность детали; далее метиз погружается в расплавленный сварочной дугой металл; метиз укрепляется и приваривается. Вследствие очень малой глубины проникновения (около 0,1 мм) этот метод используют в основном для приварки шпилек на тонколистовом металле (минимальная толщина 0,5 мм). При этом, как правило, следов сварки не видно. Обратная сторона тонколистового металла не подвергается перфорации, не деформируется и не обесцвечивается (видимая лицевая сторона) даже при ламинированной пластиком или гальваническим покрытием поверхности.

Пистолет РК-3 (рис. 8) для приварки метизов электрической дугой с коротким циклом позволяет выполнять точную сварку метизов, включая приварку даже на проблемные поверхности. Диаметры привариваемых метизов и штифтов 2—10 мм или М3—М10, длина кабеля до 235 мм, масса пистолета без кабеля 1 кг.

"Современная машиностроительная компания" (Москва) демонстрировала различные ленточные полотна, изготовленные в Германии для предприятий машиностроения. Приведем краткое описание лишь некоторых.

Универсальное полотно PROFIM42 с зубьями из быстрорежущей инструментальной стали, содержащей 8 % кобальта и 10 % молибдена. Твердость зуба полотна около 681HRC, что позволяет разрезать конструкционные и среднелегированные стали с твердостью до 45HRC. Размер пилы 67,0 × 1,6 мм.

Твердосплавные полотна ТСТ с твердостью зубьев около 1600HV, предназначенные для резки заготовок сплошного сечения с твердостью до 62HRC. Полотна можно применять также для резки силуминов, алюминиевых бронз, серого чугуна, титановых сплавов, сплавов на никелевой основе. Благодаря высоким твердости зубьев и прочности на растяжение подложного материала значительно возрастают параметры режимов резания и, как следствие, сокращается время распила.

Для продления эксплуатации пил разработчики рекомендуют работать при малой вибрации и начинать резание в щадящем режиме с постепенным увеличением нагрузки на зуб.

Компания 3М (Москва) демонстрировала на выставке различные приспособления зарубежного производства с применением абразивных материалов для металлообработки.

Гибкие шлифовальные круги 3М™ Green Corps™ (рис. 9) с минералом 3М™ Cubitron, позволяющим существенно снизить вибрацию и уровень шума, а также обеспечить более высокие производительность и качество обработки поверхности. Круги предназначены для удаления сварного шва и брызг от сварки, шлифовки поверхности, снятия фаски и т. д. Размер кругов зернистостью Р36, Р80: диаметр 115, 125 и 128 мм, толщина 3,0 и 3,7 мм.

Компания Black & Decker (США) предложила потребителям свои разработки.

Аккумуляторный винтоверт HP9048 (рис. 10) более эффективный, чем традиционные отвертки. Дополнительно он укомплектован рулеткой длиной 1,5 м и отверточной насадкой. Винтоверт работает от аккумулятора напряжением 4,8 В. Частота вращения рабочего органа 180—600 мин$^{-1}$ с реверсом. Блокировка шпинделя осуществляется в автоматическом режиме, максимальный крутящий момент винтоверта 5,5 Н · м. Для работы в труднодоступных местах и лучшего управления винтоверт оснащен трехпозиционной ручкой, имеется блокировка шпинделя.

Ударную дрель Laserstorm™ со съемным лазерным уровнем с длиной луча 3 м и быстрозажимным патроном для быстрой замены принадлежностей. Потребляемая мощность дрели 730 Вт, размер патрона 13 мм. Частота вращения рабочего органа регулируемая (0—3000 мин$^{-1}$). Максимальный диаметр сверления по дереву 32 мм, по металлу 13 мм, кир-

Рис. 8. Пистолет РК-3

Рис. 10. Аккумуляторный винтоверт HP9048

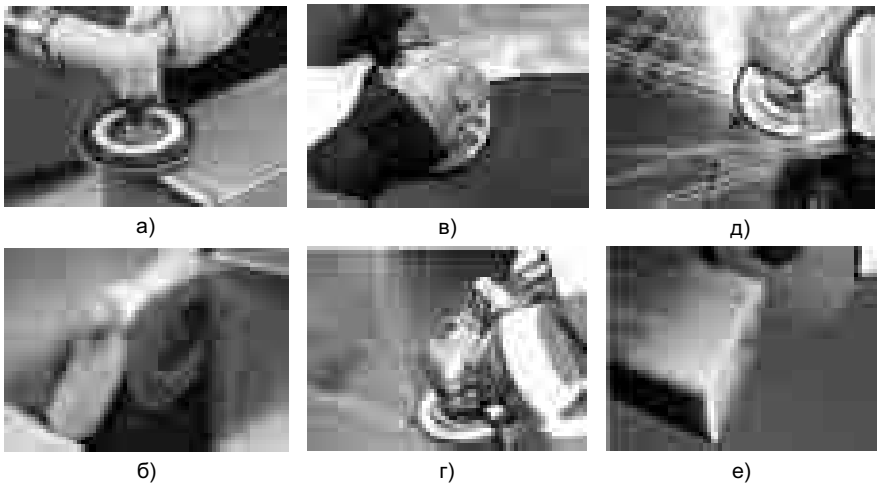


Рис. 9. Гибкие шлифовальные круги 3М™ Green Corps™ и их применение для удаления (*а*) и зачистки (*б*) сварного шва, удаления заусенцев (*в*), удаления сварного шва и брызг от сварки (*г*), шлифования поверхности (*д*) и снятия фаски (*е*)

пичу — 16 мм. Питающее напряжение дрели от батарейки напряжением 9 В.

Универсальную пилу Scorpion™ с набором пильных полотен для работы с любыми материалами. Регулируемая подошва и сменные полотна позволяют применять пилу для криволинейных пропилов. Потребляемая мощность пилы 400 Вт, число ходов полотна без нагрузки 0—5500 мин$^{-1}$.

Дельтовидную шлифовальную машину Black & Deeker для тонкой обработки углов, кромок и различных труднодоступных поверхностей. Машина имеет сменную шлифовальную подошву. Для поддержания чистоты рабочего места машина оснащена переходником для подсоединения пылесоса. Ее потребляемая мощность 180 Вт, частота вращения шлифовальной подошвы на холостом ходу 14000 мин$^{-1}$, размер шлифовальной подошвы от кромки до кромки 92 мм.

Выставка позволила специалистам выбрать лучшее, что предлагали российские и зарубежные производители. В рамках выставки была организована широкая научно-деловая программа.

А. Н. ИВАНОВ, инж.

Международная выставка "Автомеханика–2007"

С 13 по 16 мая 2007 г. в Москве на территории одного из крупнейших современных выставочных комплексов — МВК "Крокус Экспо" — прошла Международная выставка автокомпонентов оборудования, станций технического обслуживания автомобилей, запасных частей и аксессуаров "Автомеханика—2007".

Выставка организована известными выставочными компаниями ITE Expo LLC и Messe Frankfurt RUS. Важной особенностью нового выставочного проекта является стремление организаторов приблизить российскую экспозицию к требованиям международного статуса и европейского уровня организации выставки "Автомеханика Франкфурт", на протяжении многих лет являющейся стандартом в мировой автомеханической индустрии. Выставка "Автомеханика" (организатор — Messe Frankfurt) регулярно проходит в 12 странах на четырех континентах: Аргентине, Канаде, Турции, Малайзии, Мексике, Италии, КНР, ОАЭ, Испании, Таиланде, России, Германии. Крупнейшая из них — "Автомеханика Франкфурт" — состоялась в Германии в 2006 г. В ней участвовали 4650 экспонентов из 130 стран мира, выставку посетили более 165 тыс. человек. Очередная выставка пройдет во Франкфурте с 16 по 21 сентября 2008 г.

Организаторы выставки ставят цели сотрудничества как с отечественными, так и зарубежными партнерами, ассоциациями, мировыми производителями. Огромный потенциал и возможности, существующие в России в настоящее время, привлекают внимание большинства автопроизводителей во всем мире к российскому рынку автомобилей и автокомпонентов.

Так, в 2006 г. в российском автомобилестроении общий объем производства легковых, грузовых автомобилей и автобусов превысил 1,5 млн шт., что на 10,8 % больше, чем в предыдущем году. Из числа выпущенных легковых автомобилей (1174 тыс. шт.) 276 тыс. шт. были произведены на сборочных предприятиях в России преимущественно из иностранных машинокомплектов (темп роста — 175,1 %). Наряду с ростом отечественного производства возрос и импорт иностранных моделей в Россию. Импорт легковых автомобилей с 2001 г. возрастал в среднем на 37 % в год, а в 2006 г. доля импорта увеличилась до 49,4 %. Прогнозируется к 2010 г. достигнуть объема продаж легковых автомобилей в России в размере не менее 2,6 млн шт. в год, что в денежном выражении составляет более 30 млрд долларов.

Несмотря на то что в феврале 2007 г. на территории МВК "Крокус Экспо" прошло аналогичное мероприятие — 1-й Международный автомеханический салон "МАС-2007", на выставке "Автомеханика—2007" были представлены крупнейшие компании автокомпонентной и смежной отраслей из 20 стран, включая Россию, Австрию, США, Китай, Сингапур, Хорватию и др. Площадь экспозиции составила 9 тыс. м^2. В выставке приняли участие более 250 компаний.

Более 70 % экспонентов выставки составили иностранные компании и представительства. Среди них такие известные зарубежные компании, как Thule S. P. A. (Италия), Mann + Hummel GmbH (Германия), Unique Automotive Rebuilders Inc (США), Walser GmbH (Австрия), Jackcpeed Corporation (Сингапур) и др.

Отечественная автокомпонентная и сервисная отрасли были представлены компаниями "Барклай-Холдинг", "МАПТО", "АБ-Инжиниринг", "Грин-Лайт", "Мотор Технологии", СТК-1, НПФ "МЕТА", ОАО "Чусовской металлургический завод", ЗАО "Промкомтех", "Станкоимпорт", Уральский электрохимический комбинат и др. Специалисты отрасли высоко оценили преимущества выставки, позволившие участникам в рабочей атмосфере общаться с партнерами и клиентами в формате "B&B".

Заслуживают внимания коллективные экспозиции компаний ряда стран, в том числе Германии, Китая, Тайваня, Турции.

На выставке были представлены следующие разделы.

Parts & Systems: запчасти для автомобилей, компоненты привода, подвески, кузова, электрооснащения и электроника. Узлы и агрегаты, интерьер и экстерьер, управление, системы электронного контроля.

Accessories & Tuning: аксессуары, специальное оборудование, тюнинг, улучшение характеристик, элементы дизайна.

Repair & Maintenance: оборудование для обслуживания и ремонта автомобилей, для кузовных работ и покраски, организации и управления автопарком.

Service Station & Car Wash: оборудование для автосервисов, ремонтных мастерских и моек.

Среди дебютантов выставки следует отметить ряд фирм.

Компания MANN + HUMMEL GmbH (Германия) производит более 3100 наименований различных фильтров и фильтрующих элементов для 120 тыс. видов примене-

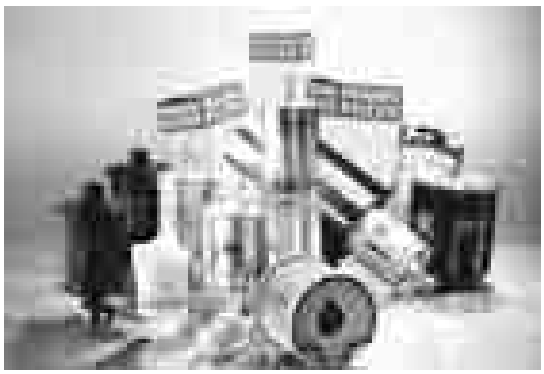


Рис. 1. Промышленная продукция для фильтрации компании MANN + HUMMEL GmbH (Германия)

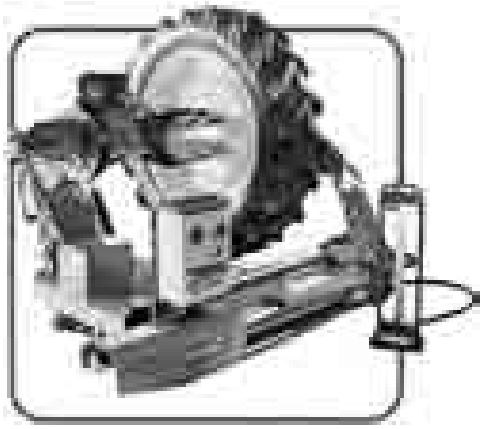


Рис. 2. Шиномонтажный стенд для колес грузовых автомобилей фирмы HESHBON CO Ltd (Южная Корея)

Рис. 3. Стапель для правки автомобильного кузова "MAXIMA" производства компании MIT GROUP (Китай)

ний и 33 тыс. автомобилей и двигателей. Продукция компании обеспечивает более 95 % европейского рынка в сегменте запасных частей. В штате более 10 тыс. сотрудников и 41 отделение по всему миру. В продуктовой линейке компании — воздушные, масляные, топливные и салонные фильтры MANN различных модификаций (рис. 1).

Компании HESHBON и SUNGSIL MACHINERY Co (Ю. Корея) впервые представили на выставке семейство автоподъемников, шиномонтажное оборудование, стенды для обслуживания систем автомобиля (в том числе сход-развал, замены трансмиссионной жидкости в АКПП и др.) (рис. 2). Рынки сбыта — Европа, Америка, Австралия, Ближний и Дальний Восток.

Компания MIT GROUP (Китай) представила на коллективном стенде различное оборудование для тестирования и ремонта автотехники под брендом "MAXIMA". (рис. 3). Стапели для правки кузовов "MAXIMA" применяются на авторизованных автосервисах ведущих мировых автопроизводителей в Китае (65 % общей доли рынка).

Фирма Covind — итальянская промышленная группа — мировой лидер в производстве кузовных компонентов для грузовиков и коммерческого транспорта. Ассортимент производства составляет 3700 наименований (бамперы, воздухоотводы, облицовка фар, подножки, двери и др.), предназначенных для ведущих производителей грузовой техники (DAF, Fiat, Ford, Iveco, MANN, Mercedes-Benz, Renault, Scania, Volvo). Фирма осуществляет весь комплекс работ, включая проектирование, подготовку производства, изготовление и контроль продукции.

Деловая программа включала проведение двухдневной конференции "Автомеханика", на которой обсуждались следующие темы: "Развитие автомобильной отрасли в России", "Рынок автокомпонентов — спрос со стороны автопроизводителей", "Послепродажное обслуживание автомобилей", "Производство автокомпонентов в России — настоящее и будущее".

Следует отметить, что международный статус выставки, высокий уровень организации, четкая профессиональная направленность и апробированная концепция обеспечили успех главной выставки автомеханической индустрии. Представленный проект — явление перспективное, хотя опыт только нарабатывается и данное мероприятие можно назвать экспериментом.

Как будет развиваться структура автокомпонентных выставок в России? Надеемся, что здоровая, цивилизованная конкуренция на автокомпонентном рынке позволит специалистам выбрать партнеров и ускорить интеграцию России в мировую рыночную экономику.

Е. С. ДОБРИНСКИЙ, канд. техн. наук (ЦЭП ВОК),
В. А. СЕИН, инж. (ОАО "АСМ-холдинг")

Издательский центр "Технология машиностроения"

127018, Москва, ул. Октябрьская, 35

Сдано в набор 31.07.2007. Подписано в печать 10.09.2007. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная. Усл.-печ. л. 10,23. Уч.-изд. л. 14,70. Заказ 10/07.

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"