ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

11 2011 (136)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Коныгин С.Б. Стохастический метод оценки параметров деградации соединений конструктивных элементов 3

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Карабанов В.В., Бохоров И.О. Процессы взаимодействия металлов при пайке 8

Быковский О.Г. Современное состояние технологии сварки цветных металлов и сплавов 19

Сборка с использованием клеев

Безменов В.С., Игнатов А.В. Принципы построения автоматизированных дозирующих устройств для нанесения клеевых композиций в процессах сборки в машиностроении 33

В помощь конструктору, технологу

Лазарчук В.С., Осетров В.Г. Способы реализации виртуальной сборки машин 44

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу “Роспечать” – **79748**, Объединенному каталогу “Пресса России” – **84967**, каталогу "Почта России" – **60257**) или непосредственно в издательстве
Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: sborka@mashin.ru
Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА
А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор)
А.А. ГУСЕВ
М.В. ВАРТАНОВ
А.М. ДАЛЬСКИЙ
И.Н. ЗИНИНА
Ю.Л. ИВАНОВ
Ю.Г. КОЗЫРЕВ
А.И. КУМЕНКО
А.В. МЕДАРЬ
Е.А. МИКРИН
В.В. ПОРОШИН
Б.В. ШАНДРОВ
А.А. ШАТИЛОВ
А.Г. ХОЛОДКОВА
Г.А. ЯРКОВ

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО
БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО
ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН
А.А. СУПОНЯ
В.М. КОРНИЕНКО
ВОЛГОГРАД
В.Г. КАРАБАНЬ
М.Г. КРИСТАЛЬ
В.И. ЛЫСАК
В.М. ТРУХАНОВ
ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ
Б.А. ЯКИМОВИЧ
В.Г. ОСЕТРОВ
КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ
КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ
КОЛОМНА
Ю.Д. АМИРОВ
КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН
В.И. ШПОРТ
А.М. ШПИЛЕВ
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ
С.В. ДМИТРИЕВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ
НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ
ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ
ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ
Г.А. ХАРЛАМОВ
ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ
А.И. СЕРДЮК
А.П. ФОТ
РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
В.В. НЕПОМИЛУЕВ
А.Н. СЕМЕНОВ
САМАРА
М.А. ЕВДОКИМОВ
Ю.А. ВАШУКОВ
Г.А. КУЛАКОВ
В.А. НИКОЛАЕВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.Ф. КУЗЬМИН
Е.В. ШАЛОБАЕВ
ТОЛЬЯТТИ
А.И. РЫЖКОВ
Б.Ф. ХАЗОВ
ТУЛА
В.В. ПРЕЙС
ХАБАРОВСК
В.А. ЛАШКО

Украина
КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН
В.А. МАТВИЕНКО
ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ
СЕВАСТОПОЛЬ
Е.Л. ПЕРВУХИНА

Беларусь
МИНСК
В.Л. БАСИНЮК
М.Л. ХЕЙФЕЦ
ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:
Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1747 от 25 февраля 2000 г.

© Издательство “Машиностроение”, “Сборка в машиностроении, приборостроении”, 2011

THE MONTHLY NEWSMAGAZINE FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

11 2011 (136)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Konygin S.B. Stochastic method for estimation the parameters of structural elements connections degradation . . . 3

Assembly welding works. Solder

Karabanov V.V., Bokhorov I.O. Processes of interaction of metals at a ration. . . . 8

Bikovski O.G. Current state of technology of welding of nonferrous metals and alloys . . . 19

Assembly with use glue

Bezmenov B.S., Ignatov A.V. Principles for construction of automatized pneumatic dosers for adhesive composition application during assembling in machine engineering . . . 33

Industrial and design engineer's aid

Lazarchuk V.S., Osetrov V.G. Ways of realization of virtual assemblage of cars . . . 44

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency – **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" – **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" – **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.
http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building"
107076, Moscow, Stromynsky per. 4
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board –
Member of Russian Academy of Science
F.M. MITENKOV

Editors

MOSCOW
A.S. VASIL'EV (Chief editor)
M.V. VARTANOV
A.M. DALSKY
A.A. GUSEV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
V.V. POROSHIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA
G.A. YARKOV

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO
BRIANSK
O.A. GORLENKO
VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
V.M. KORNIENKO
VOLGOGRAD
M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV
IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
B.A. YAKIMOVICH
V.G. OSETROV
KAZAN
R.I. ADGAMOV
KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV
KOLOMNA
Yu.D. AMIROV
KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV
NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV
NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV
OMSK
V.N. KOSTIUKOV
OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV
ORENBURG
A.N. POLYAKOV
A.I. SERDUK
A.P. FOT
RYBINSK
V.F. BEZIAZYSHNY
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV
SAMARA
M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
G.A. KULAKOV
V.A. NIKOLAEV
ST.-PETERSBURG
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV
TULA
V.V. PREYS
TOLIATI
B.F. KHAZOV
A.I. RYZHKOV
KHABAROVSK
V.A. LASHKO

Ukraine
KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO
DONETSK
A.N. MIKHAILOV
SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

Belarus
MINSK
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ
GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Executive editors of current issue:
Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media.
Registration certificate ПИ № 77-1747, February 25, 2000 Free price

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2011

УДК 519.876.5

С.Б. Коныгин, *канд. техн. наук (Самарский государственный технический университет)*
E-mail: steevis@inbox.ru

Стохастический метод оценки параметров деградации соединений конструктивных элементов

Представлен метод моделирования процессов деградации соединений, основанный на использовании вероятностного клеточного автомата. Описана методика моделирования и определения интегральных параметров. Приведен пример использования метода для моделирования коррозионных процессов.

A method for connections degradation processes modeling using a probability cellular automaton is presented. A technique for modeling and integral parameters estimation is described. An example of corrosion modeling is offered.

Ключевые слова: деградация элементов конструкции, моделирование, вероятностный клеточный автомат.

Keywords: structural elements degradation, modeling, probability cellular automaton.

Современные технические изделия, как правило, характеризуются достаточно высокой степенью сложности и содержат большое количество соединений конструктивных элементов. Указанные соединения являются одним из важнейших факторов, определяющих надежность изделий в целом, и поэтому предварительная теоретическая оценка интенсивности процессов их деградации является весьма актуальной технической задачей на стадии проектирования.

Многие соединения представляют собой контакты различных фаз, и в них может одновременно протекать весьма широкий круг физико-химических процессов (ФХП), в том числе негативного характера. Например, значительную часть случаев представляют химические или электрохимические коррозионные процессы в условиях воздействия механических нагрузок. Поэтому построение математических моделей процессов деградации является весьма сложной задачей и требует возможности учета значительного количества факторов.

Все сказанное ставит задачу поиска новых методов теоретического описания процессов деградации соединений, которые бы позволяли на этапе проектирования быстро проводить оценку влияния тех или иных факторов на динамику деградации.

Постановка задачи моделирования. В рамках настоящей работы для оценки параметров деградации соединений конструктивных элементов предлагается использовать метод вероятностного клеточного автомата (ВКА) [2]. Вариант данного метода, позволяющий с единой методологической позиции моделировать широкий круг ФХП на атомно-молекулярном уровне, был предложен и опубликован ранее в работах [4–6].

Суть метода заключается в том, что в интересующей области соединения выбирается микроскопический объем материала и рассматривается на атомно-молекулярном уровне (рис. 1).

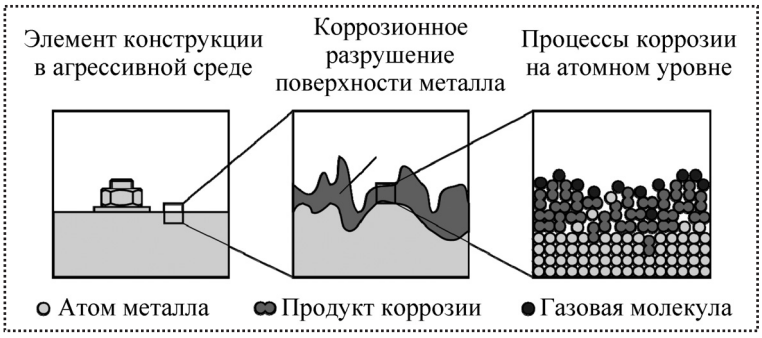

Рис. 1. Пример выбора объекта моделирования

Процесс деградации соединения в целом рассматривается как результат протекания в нем чрезвычайно большого количества элементарных актов случайной перестройки атомно-молекулярной структуры и изменения химического состава. Предлагаемый вариант метода ВКА проводит прямую имитацию указанных атомно-молекулярных процессов с помощью генератора случайных чисел.

Процесс моделирования процессов деградации заключается в следующем:

• имеется атомно-молекулярная структура соединения в начальный момент времени;

• с помощью генератора случайных чисел моделируются элементарные акты ФХП, протекающих в соединении в процессе эксплуатации изделия;

• путем статистической обработки атомно-молекулярных структур в заданные моменты времени определяются значения интегральных (макроскопических) параметров, которые могут быть использованы в дальнейшей работе.

Методика моделирования. Согласно базовому принципу предложенного в работах [4–6] метода выделенный микрообъем соединения (см. рис. 1) считается состоящим из множества плотноупакованных атомных объемов, каждый из которых может быть занят частицей или оставаться пустым. Сетке атомных объемов моделируемой системы ставится в соответствие сетка ячеек ВКА. Частицам ставятся в соответствие состояния ячеек S (каждое состояние обозначено буквой со шляпкой), а случайным ФХП – переходы J ячеек между состояниями [4]

$$S = \{\hat{Z},\ \hat{A},\ \hat{B},\ \ldots\}$$
$$J = \{(\hat{Z},\hat{A}),\ (\hat{Z},\hat{B}),\ (\hat{A},\hat{B}),\ \ldots\}. \qquad (1)$$

Пары состояний в уравнении (1) представляют, соответственно, исходный и результирующий типы частиц для каждого ФХП.

Моделирование производится в пошаговом режиме с временной дискретизацией τ, которая, как правило, тесным образом связана с периодом тепловых колебаний частиц τ_0.

Случайные переходы на каждом шаге моделирования реализуются с вероятностями W, которые определяются на основании базовых физических принципов [4]:

$$W = \{w_{ZA},\ w_{ZB},\ w_{AB},\ \ldots\}.$$

Вероятности реализации за один шаг ВКА для наиболее распространенных процессов, как правило, определяются по молекулярно-кинетическим или термоактивационным принципам. Вероятности реализации процессов, связанных с соударениями газовых частиц с поверхностями (адсорбция, конденсация) могут быть найдены по следующему выражению [4]:

$$w_{\text{мк}} \sim \gamma\tau_0\delta^2 p\sqrt{\frac{N_A}{2\pi kTM}}. \qquad (2)$$

Для широкого круга ФХП, протекающих по термоактивационному механизму, вероятность реализации вычисляется следующим образом [4]:

$$w_{\text{терм}} \sim \exp\left(-\frac{W_{\text{а}}}{kT}\right). \qquad (3)$$

В уравнениях (2) и (3) приняты следующие обозначения: γ – коэффициент прилипания адсорбирующейся (конденсирующейся) частицы к поверхности; τ_0 – период тепловых колебаний частицы в конденсированной фазе; δ – среднее межмолекулярное расстояние (размер ячеек ВКА); p – давление газа в системе; N_a – число Авогадро; k – постоянная Больцмана; T – абсолютная температура; M – молекулярная масса; $W_{\text{а}}$ – энергия активации ФХП.

Особенностью предлагаемого варианта метода ВКА является то, что он позволяет в режиме реального времени для каждой частицы корректировать значения энергии активации ФХП в зависимости от локальной атомно-молекулярной структуры

$$W_{\text{а}} = W_{\text{а}0} + \sum_i \Delta W_{\text{а}}, \qquad (4)$$

электрических полей (как внешних, так и локальных) [1]

$$W_{\text{а}} = W_{\text{а}0} \pm qE\frac{\delta}{2}, \qquad (5)$$

и механических напряжений [6]

$$W_a = W_{a0} \pm \kappa\sigma. \quad (6)$$

В уравнениях (4) – (6) приняты следующие обозначения: W_{a0} – базовое значение энергии активации ФХП; ΔW_{a0} – изменения энергии активации, обусловленные взаимодействием с соседними частицами; q – заряд частицы; E – напряженность электрического поля; σ – механические напряжения; κ – коэффициент, отражающие влияние механических напряжений на энергию активации ФХП.

Учет изменений энергии активации позволяет методу ВКА более тонко подойти к анализу процессов деградации соединений в условиях электрических и механических воздействий.

Прямое имитационное моделирование ФХП осуществляется с помощью генератора случайных чисел, равномерно распределенного на интервале [0; 1]. На каждом шаге моделирования для каждой ячейки ВКА формируется набор возможных элементарных процессов (включая "нулевой" процесс, при котором ничего не происходит), и определяются вероятности их реализации. Затем из отрезков, длина которых равна найденным вероятностям ФХП, формируется единичный интервал. После этого генерируется случайное число, и определяется, в какой из интервалов оно попало. Соответствующий отрезку ФХП считается реализующимся в данной ячейке ВКА на данном шаге моделирования. В результате тестирования установлено, что данный подход обеспечивает реализации ФХП, соответствующие исходным вероятностям.

Для практической реализации указанной методики был разработан специализированный программный продукт [6], позволяющий пользователю проводить все этапы процесса моделирования: от формирования списка химических компонентов и ФХП до статистической обработки и отображения результатов.

Обработка результатов моделирования. Непосредственные результаты моделирования процессов деградации представляют собой распределения частиц по ячейкам ВКА, соответствующие атомно-молекулярной структуре моделируемого соединения. Путем их статистической обработки могут быть определены интегральные параметры, отражающие состояние рассматриваемых соединений. Краткий обзор возможностей метода ВКА при определении интегральных параметров приведен в табл. 1.

Таблица 1

Краткий обзор возможностей метода ВКА при определении значений интегральных параметров соединения

Тип параметров	Примеры	Равновесие	Динамика
Структурные	Взаимное расположение частиц	Широкие возможности	Широкие возможности
Фазовые	Компонентный состав, объем фаз	Широкие возможности	Ограниченные возможности
$p - V - T$ параметры	Удельный объем (плотность)	Весьма ограниченные возможности	Весьма ограниченные возможности
Тепловые	Энтальпия, теплоемкость	Возможность отсутствует	Возможность отсутствует
Молекулярно-кинетические	Коэффициент диффузии	–	Достаточно широкие возможности
Механические	Деформация, внутренние напряжения	Весьма ограниченные возможности	Весьма ограниченные возможности
Электрические (структурные)	Заряд, напряженность	Широкие возможности	Широкие возможности
Электрические (омические)	Удельное сопротивление	–	Ограниченные возможности

Таблица 2

Формулы для вычисления некоторых интегральных параметров

Интегральный параметр	Формула для вычисления
Характерный размер области частиц типа s	$L_s = \sum_{i \in \Lambda} \psi_{si} \delta$
Количество частиц типа s	$N_s = \sum_{i \in \Lambda} \psi_{si}$
Объемная концентрация частиц типа s	$n_{sv} = \frac{\sum_{i \in \Lambda} \psi_{si}}{N_\Lambda \delta^3}$
Поверхностная концентрация частиц типа s	$N_{ss} = \frac{\sum_{i \in \Lambda} \psi_{si}}{N_\Lambda \delta^2}$
Мольная (атомная) доля частиц типа s	$x_s = \frac{\sum_{i \in \Lambda} \psi_{si}}{N_\Lambda}$
Масса	$m = \sum_s \sum_{i \in \Lambda} \psi_{si} m_s$
Плотность	$\rho = \frac{\sum_s \sum_{i \in \Lambda} \psi_{si} m_s}{N_\Lambda \delta^3}$
Заряд	$Q = \sum_s \sum_{i \in \Lambda} \psi_{si} q_s$
Плотность заряда	$\rho_Q = \frac{\sum_s \sum_{i \in \Lambda} \psi_{si} q_s}{N_\Lambda \delta^3}$
Примечание. m_s – масса частицы типа s, q_s – ее заряд.	

Формулы, используемые для оценки некоторых наиболее общих параметров, сведены в табл. 2. Здесь через Λ обозначена область, для которой определяется значение интегрального параметра, содержащая N_Λ ячеек. Символ ψ_{si} равен единице, если i-я ячейка содержит частицу типа s, и равен нулю в любом другом случае

$$\psi_{si} = \begin{cases} 1, & c_i = s, \\ 0, & c_i \neq s. \end{cases}$$

Указанный набор интегральных параметров не является окончательным и в каждом конкретном случае по желанию разработчика модели деградации соединения может быть дополнен новыми.

Пример использования метода. В качестве примера для демонстрации метода рассмотрим процесс коррозионного разрушения контакта двух металлов в газовой среде. Будем считать, что в моделируемой системе присутствуют химические компоненты и элементарные процессы, представленные в табл. 3 [3]. При этом также примем, что металл *B* не реагирует с газовой средой, а продукт реакции между металлом *A* и газовой молекулой является летучим соединением и может десорбироваться с поверхности.

В начальный момент времени система представляла собой идеальный контакт двух металлов, граничащий с агрессивной газовой средой. Затем с помощью разработанного программного продукта проводилась прямая имитация случайных элементарных ФХП, представленных в табл. 3.

Вероятности реализации процессов адсорбции газовых частиц определялись с помощью выражения (2). Процессы десорбции, диффузии и химическая реакция считались протекающими по термоактивационному механизму с вероятностями (3).

Результаты моделирования в каждый момент времени представляли собой атомно-молекулярные структуры (рис. 2, *а*). В качестве

Таблица 3

Учитываемые химические компоненты и процессы

Химический компонент	Состояние ячейки ВКА	Элементарный процесс	Переходы между состояниями ячеек ВКА
Металл *A*	$\hat{A}$	Адсорбция	$\hat{Z} \to \hat{C}$
Металл *B*	$\hat{B}$	Десорбция	$\hat{C} \to \hat{Z}$ $\hat{D} \to \hat{Z}$
Газовая частица *C*	$\hat{C}$	Диффузия	$\hat{A} \to \hat{C} + \hat{C} \to \hat{A}$ $\hat{D} \to \hat{C} + \hat{C} \to \hat{D}$
Соединение *AC*	$\hat{D}$	Химическая реакция	$\hat{A} \to \hat{D} + \hat{C} \to \hat{D}$
Нет частицы	$\hat{Z}$		

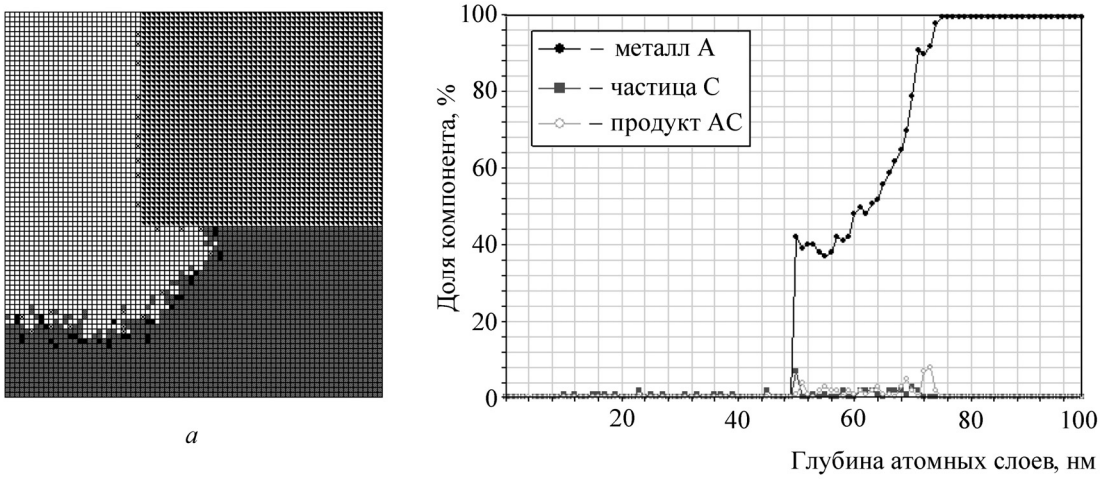

Рис. 2. Результаты моделирования процесса подповерхностной коррозии на границе металлов методом ВКА:
а – атомно-молекулярная структура; *б* – профиль химического состава

примера статистической обработки на рис. 2, *б* представлены профили химического состава системы по глубине.

Из результатов моделирования видно, что в данном случае метод позволяет без дополнительных модификаций учесть как равномерную коррозию одного из металлов, так и подповерхностную составляющую. Также следует отметить высокую степень наглядности результатов моделирования методом ВКА, что позволяет глубже вникнуть в суть протекающих процессов.

Предложенный вариант метода ВКА может представлять интерес для исследователей и инженерных работников, занимающихся вопросами деградации соединений конструктивных элементов. Он может быть использован для анализа следующих весьма распространенных процессов:

- химическая коррозия (в том числе достаточно сложные случаи подповерхностной, межкристаллитной и других типов коррозии);
- электрохимическая коррозия;
- усталостные разрушения.

Одним из направлений дальнейшего развития данного подхода может быть важный вопрос учета влияния всевозможных дефектов кристаллической структуры на динамику процессов деградации.

Библиографический список

1. **Абдуллаев Г.Б., Джафаров Т.Д.** Атомная диффузия в полупроводниковых структурах. М.: Атомиздат, 1980. 232 с.

2. **Ванаг В.К.** Исследование пространственно распределенных динамических систем методами вероятностного клеточного автомата // Успехи физических наук. 1999. Т. 169, № 5. С. 481–505.

3. **Жук Н.П.** Курс теории коррозии и защиты металлов. М.: Альянс, 2006. 472 с.

4. **Коныгин С.Б., Лесухин С.П.** Стохастическая модель окисления металлов в газовой среде // Известия Самарского научного центра РАН, т. 12. № 1 (2), 2010. С. 377–380.

5. **Коныгин С.Б.** Применение метода вероятностного клеточного автомата к моделированию гетерогенных систем // Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море. 2011. № 4. С. 30–31.

6. **Разработка** физических принципов и алгоритмов компьютерного моделирования базовых процессов формирования микроструктур методами вероятностного клеточного автомата / А.Н. Агафонов, А.В. Волков, С.Б. Коныгин и др. // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: физико-математические науки, 2007, № 1. С. 99–107.

7. **Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Е.Э.** Кинетическая природа прочности твердых тел // Успехи физических наук, 1972. Т. 106. Вып. 2. С. 193–228.

УДК 621.791.048

В.В. Карабанов, *канд. техн. наук,* **И.О. Бохоров,** *инженер*

Процессы взаимодействия металлов при пайке

Рассмотрены закономерности протекания взаимосвязанных физико-химических процессов при пайке металлов и их влияние на свойства паяных соединений.

Lows of course of the interconnected physical and chemical processes are considered at a ration of metals and their influence on properties of the connections received at a ration.

Ключевые слова: пайка, смачивание, растекание, растворение, диффузия, диспергирование.

Keywords: the soldering, wetting, spreading, dissolving, dispersing.

Пайку можно рассматривать как процесс взаимодействия жидкого и твердого металлов с образованием металлической связи. Характер взаимодействия зависит от свойств металлов, режима и условий пайки. Жидкое состояние одного из металлов (припоя) обеспечивает возможность его взаимодействия с паяемым металлом с обобществлением внешних электронов. Процесс возникновения межатомных связей взаимодействующих металлов называют *смачиванием*. Оно может протекать при условии, когда силы связи между атомами жидкого и твердого металлов выше, чем связи у атомов жидкого металла. С увеличением температуры возрастает активность взаимодействия металлов.

Высокая активность процесса смачивания обусловлена повышенным энергетическим состоянием поверхностных слоев твердого и жидкого металлов. Ввиду односторонних связей поверхностных атомов с прилежащими к ним соседними атомами их свободная энергия значительно превышает силу связей внутри металла. Эти избыточные силы приводят к возникновению поверхностного натяжения с большим запасом потенциальной энергии. Эта энергия, отнесенная к единице поверхности, называется *удельной* или *свободной поверхностной энергией*.

О величине поверхностного натяжения можно судить по размеру капли жидкости, располагаемой на несмачиваемой твердой поверхности и сохраняющей свою компактную форму. Под действием сил поверхностного натяжения свободно взвешенная капля жидкости неизменно принимает сферическую форму, обладающую наименьшей поверхностью при данном объеме.

Характер смачиваемости металлическим расплавом твердой поверхности определяется по состоянию капли расплава на нагретой в защитной среде до температуры пайки твердой металлической поверхности. При соприкосновении с поверхностью твердого тела капля расплава может растекаться по ней или принимать деформированную форму, близкую к исходной. Во втором случае смачивание отсутствует или происходит частично. При смачивании с единицы поверхности твердого металла освобождается поверхностная энергия A, которая определяется разностью в силах поверхностного натяжения на границе раздела твердого тела с атмосферой $\sigma_{тг}$ и твердого тела с жидким металлом $\sigma_{тж}$:

$$A = \sigma_{тг} - \sigma_{тж}.$$

Чем больше разность этих величин, тем выше активность и сплошность смачивания. Следовательно, величина поверхностного натяжения является основным параметром, определяющим активность и качество протекания процесса пайки.

Определение величины поверхностного натяжения жидких металлов и сплавов осуществляют различными методами [2], некоторые из которых основаны на изучении формы и раз-

меров капли расплава. *Метод неподвижной капли* основан на изучении формы капли, которая определяется величиной поверхностного натяжения и плотностью расплава в соответствии с уравнением капиллярности. *Метод висячей капли* основан на изучении параметров висячей капли, образующейся при оплавлении кончика стержня изучаемого материала при медленном формировании капли, в процессе вытекания жидкости из трубки. *Метод массы капель* основан на определении их массы в момент отрыва.

Смачивание расплавом металла (припоем) твердой металлической поверхности при пайке является начальной стадией сложного физико-химического взаимодействия на границе контакта металлов [6]. Силы межатомных связей, значительно превышающие силы атомных связей жидкого металла, приводят не только к процессу смачивания на участке контакта металлов, но и осуществляют захват атомов на свободной поверхности жидкого металла, прилежащей к границе контакта. Такой процесс последовательного перехода поверхностных атомов жидкого металла на поверхность твердого, приводящий к расширению площади смачивания, называется *процессом растекания металлического расплава* (*припоя*).

О силе атомного взаимодействия жидкого и твердого металлов свидетельствуют известные факты. Если чистую металлическую пластину привести в соприкосновение со спокойной поверхностью воды, а затем, сохраняя ее горизонтальное положение, оторвать от воды, то ее контактная поверхность останется смоченной водой. Следовательно, разрыв произошел по внутренней области воды, где атомные связи слабее, чем на границе контакта пластинки с водой.

При испытании на разрыв торцевого паяного соединения разрушение будет происходить по припою, а не по границе спая. Такая закономерность сохраняется для любых припоев и режимах пайки.

Следовательно, движущей силой процессов смачивания и растекания является сила связей, образующаяся между поверхностными атомами жидкого и твердого металлов. Процесс растекания происходит при условии:

$$\sigma_{тж} > \sigma_{тг} + \sigma_{жг} \cos\theta.$$

Величина краевого угла смачивания θ является наглядным показателем качества смачивания металлической твердой поверхности расплавом. Краевой угол образуется между касательной к поверхности капли жидкого металла и плоскостью твердого тела в точке их пересечения. При полном смачивании краевой угол равен нулю.

При высокотемпературной пайке удовлетворительное смачивание наблюдается при краевом угле, не превышающем 40°.

Взаимосвязь процессов смачивания и растекания является основой кинетического механизма формирования паяного шва.

Процесс растекания в решающей степени зависит от температуры, времени взаимодействия и химического состава металлов. Кинетика растекания зависит от нескольких объемных сил, действующих на расплав – вязкого сопротивления перемещению, инерционных, гравитационных, давления поверхностного слоя и др. [7].

Если сила взаимодействия жидкого и твердого металлов, действующая по периметру смачивания, вызывает перемещение расплава по твердой поверхности, то движение остальной массы расплава определяется объемными силами. Поверхностные силы, действующие в области периметра растекания на расстоянии $10^{-6}...10^{-7}$ см от поверхности твердого тела, многократно превосходят объемные силы, особенно в начальной стадии растекания, когда скорость перемещения периметра расплава практически зависит только от поверхностных сил взаимодействия жидкого и твердого металлов. Начальная скорость растекания жидкого алюминия по никелю достигает $1{,}56 \cdot 10^{-2}$ с, при которой диаметр площади растекания увеличивается на 30...50 см/с.

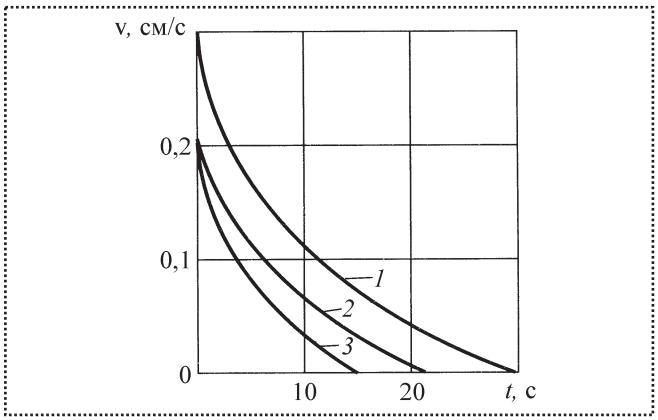

Рис. 1. Временная зависимость скорости растекания (при 750 °С) алюминия по никелю (*1*), железу (*2*), кобальту (*3*) в вакууме [(3...5)×10^{-6} Па]

Временна́я зависимость скорости растекания v (при 750 °С) алюминия по различным металлам представлена на рис. 1.

В общем случае скорость и режим растекания жидкого металла определяются соотношением поверхностных и объемных сил, действующих по периметру смачивания. С уменьшением толщины слоя растекающегося расплава ухудшаются условия подпитки периметра растекания расплава, возрастает сдерживающая роль поверхностного натяжения, ускоряется насыщение расплава элементами твердого металла, повышающими его вязкость и температуру плавления. Скорость растекания быстро снижается и с началом кристаллизации расплава по периметру растекания оно прекращается. При слабой химической активности жидкого и твердого металлов или ее отсутствии температурной зависимости процесса растекания может не наблюдаться.

Скорости растекания обычно определяют, используя боковую видеосъемку или вертикальное фиксирование капли расплава, попадающей при заданной температуре на твердую поверхность металла.

При растекании расплавов, содержащих жидкотекучие металлы, может происходить их ликвация и поверхностное растекание за пределами растекшейся капли расплава с образованием цветного ореола (медь).

Поверхностное натяжение снижается при повышении температуры и при введении в расплав поверхностно-активных элементов, в том числе из окружающей газовой среды или флюса [1].

Кратковременные процессы смачивания и растекания подготавливают условия для протекания сложного и длительного растворно-диффузионного процесса, формирующего состав и структуру паяного соединения. Обобществление электронов взаимодействующих атомов металлов сопровождается повышением активности самих атомов (ионов), которые, пересекая границу контакта, начинают проникать в глубину соседнего металла. Переход элементов твердого металла в жидкий определяется как процесс растекания; проникновение элементов жидкого металла в твердый определяется диффузионным механизмом. Растворно-диффузионный процесс может возникать между металлами, образующими непрерывные или ограниченные растворы, эвтектические смеси и химические соединения. Кинетика растворно-диффузионного процесса определяется рядом факторов, главными из которых являются физико-химические свойства взаимодействующих металлов, температура и время взаимодействия, тип диаграмм состояния компонентов жидкого и твердого металлов, соотношение количеств жидкой и твердой фаз при температуре процесса. Растворно-диффузионный процесс может протекать с преимуществом растворного или диффузионного (в жидком металле) процесса.

Процесс растворения паяемого металла в расплаве припоя лимитируется либо скоростью перехода атомов в расплав припоя, либо скоростью диффузии в нем. В первом случае происходит быстрое снижение скорости растворения паяемого металла до полного насыщения расплава, с образованием на границе контакта металлов фазы, располагающейся на диаграмме состояния наиболее близко к его основному компоненту. В случае высокой активности растворного и диффузионного процессов при пайке изменение свойств поверх-

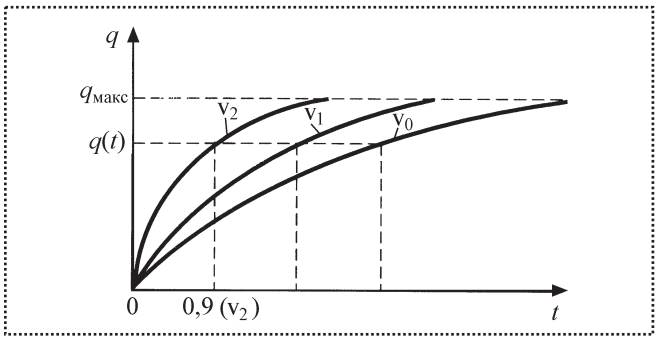

Рис. 2. Зависимость процесса растворения (потери массы *q*) твердого металла в неподвижном v_0 и подвижном (v_1 и v_2) жидком металле от времени выдержки *t* при $v_2 > v_1$

ностного слоя паяемого металла вызывает изменение его растворимости в припое, которая может как ускоряться, так и замедляться. При любом механизме скорость растворения v со временем снижается, что выражается характерной кривой (рис. 2).

Скорость растворения паяемого металла в жидком припое значительно выше скорости диффузии элементов припоя в паяемом металле, поэтому состав зоны сплавления быстро меняется, пока не достигнет равновесной концентрации, соответствующей пересечению изотермы температуры пайки с линией ликвидуса. С приближением состава расплава к равновесному скорость растворения паяемого металла замедляется, диффузионный массоперенос в паяемый металл повышается. При определенном пересыщении происходит выделение из расплава припоя частиц твердого сплава. Процесс кристаллизации расплава будет протекать до полного перехода жидкости в твердый раствор, т.е. до полной изотермической кристаллизации расплава припоя в паяльном зазоре.

Однако равновесия в области паяного шва и в этом случае не достигается. При продолжении нагрева активно протекает процесс диффузионного выравнивания состава и при очень длительной (многочасовой) выдержке температуры состав зоны сплавления приближается к составу паяемого металла, исчезают границы и структура зоны сплавления. Такой температурный режим применяют при пайке сталей чугуном [5]. Диффузионный переход углерода из чугуна в сталь и диффузия легирующих элементов стали в чугун приводят к выравниванию состава и структуры металла в области шва.

При пайке легированных сталей и сплавов, содержащих компоненты с различной растворимостью в расплаве припоя, может происходить их селективное растворение. Активность такого перехода компонентов определяется диффузией их из внутренних слоев паяемого металла. В этих условиях рост растворяемого слоя металла отстает от роста диффузионного слоя, в результате чего поверхностный слой паяемого металла будет обеднен легкорастворимым компонентом, что вызывает процесс фазовых превращений при пайке. Образование такой зоны и ее глубина зависят от соотношения скоростей растворения и диффузии компонентов металла. При соответствующих режимах охлаждения может происходить выравнивание состава металла.

При высокотемпературной пайке селективное растворение может происходить у жаропрочных сталей, содержащих никель, марганец или хром, имеющих более высокую скорость растворения по сравнению с железом.

Если растворение паяемого металла происходит при непрерывном отводе компонентов от фронта растворения, то скорость селективного растворения максимальна. С течением времени она уменьшается до некоторого значения, отвечающего стационарному режиму растворения металла, при котором вклад различных компонентов в общую скорость растворения пропорционален их массовой доле в исходном металле.

Основная опасность селективного растворения паяемого металла – это изменение механических и химических свойств металла при обеднении поверхностного слоя тем или иным элементом. Селективное растворение может сопровождаться обезуглероживанием стали, порообразованием и распадом перлита.

Вопросы селективного растворения паяемого металла становятся особенно актуальны-

ми при длительных режимах пайки массивных изделий (автовакуумная пайка), а также при взаимодействии металлических расплавов с трубопроводными системами атомных электростанций.

Наиболее активно процесс растворения протекает в области межзеренных (межкристаллитных) границ, где атомы металла обладают большей потенциальной энергией, чем в массе металла, что и обусловливает их большую вероятность перехода в жидкий металл [3]. В результате на этих участках наблюдается углубление фронта растворения и повышается возможность проникновения расплава припоя по границам зерен, что может приводить к межкристаллитному разрушению.

Проникновение припоя по границам зерен можно наблюдать при пайке сталей медью. При этом происходит охрупчивание паяемого металла и снижение механических свойств паяных соединений. Интенсивность проникновения зависит от содержания легирующих компонентов в стали. При пайке легированных сталей отдельные легирующие элементы могут как ускорять, так и замедлять диффузию меди в стали. Кремний, алюминий, фосфор замедляют диффузию; марганец и хром ускоряют ее. Уменьшение скорости диффузии меди в стали приводит к снижению активности ее межзеренного проникновения.

Диффузионный процесс в прослойке жидкого припоя при капиллярной пайке разнородных металлов с различной растворимостью в припое приводит к изотермическому массопереносу более растворимого металла на поверхность менее растворимого [8]. В результате на поверхности второго металла образуется слой твердого раствора или интерметаллидного соединения, через который диффузионный процесс будет продолжаться. Образование металлидов наблюдается на поверхности молибдена при переносе на него алюминия через прослойку жидкого припоя. Если в припое растворимость паяемых металлов одинакова, то металлиды образуются не на поверхности металлов, а внутри паяного шва. Такой процесс можно наблюдать при пайке меди с алюминием.

При пайке может происходить изотермический перенос неметаллических элементов, входящих в состав паяемых металлов. Наиболее активно протекает процесс массопереноса углерода от сталей, содержащих менее сильные карбидообразующие элементы, к сталям с более сильными карбидообразующими элементами. Может также происходить диффузионный массоперенос кислорода, азота и других элементов, а также из газовой среды через жидкий металл к поверхности твердого. При наличии процесса массопереноса скорость растворения металла значительно больше.

Изотермический массоперенос углерода может привести к обезуглероживанию углеродистых и низколегированных сталей и к науглероживанию коррозионно-стойких хромистых и хромоникелевых сталей. При нагреве свыше 500 °С в углеродистой стали происходит диссоциация цементита с образованием положительно заряженных ионов углерода, образующих с кислородом окись углерода, диффундирующая в жидкий металл – припой. При адсорбции оксида углерода на поверхность металла происходит каталитическое ослабление связей в окисле с последующим отрывом от нее атомов кислорода. На поверхности железа углерод может отлагаться в форме графита. С поверхности стали с активным карбидообразующим элементом углерод диффундирует в сталь, в результате чего происходит науглероживание ее поверхностного слоя. Уменьшение науглероживания аустенитных сталей достигается введением в припой циркония или ниобия, поглощающих кислород и углерод. Обезуглероживание стали увеличивается с повышением температуры, вследствие возрастания коэффициента диффузии и с уменьшением содержания в ее составе карбидообразующих элементов. При содержании в стали хрома свыше 12 % обезуглероживания не происходит.

Иногда на поверхности углеродистой стали в паяном шве можно обнаружить черную

пленку с высоким содержанием углерода. Такая пленка образуется в результате встречного изотермического переноса на углеродистую сталь сильных карбидообразующих элементов, которые вступили во взаимодействие с углеродом с образованием карбидного слоя.

Использование диффузионного потока углерода через прослойку расплава припоя является одним из способов значительного повышения механических свойств паяных соединений. В процессе пайки углеродистых сталей диффузионный поток углерода активизирует диффузионный перенос элементов паяемого металла через жидкую прослойку припоя. Растворяемый металл с более низким содержанием углерода переносится к поверхности металла с более высоким его содержанием, где он участвует в образовании столбчатых кристаллов, которые в своем развитии, через прослойку припоя (медного) соединяют паяемые поверхности, в результате чего отмечается скачок прочности паяного соединения на сдвиг с 300 до 600 МПа, а ударной вязкости с 3 Дж/см^2 до 16,5 Дж/см^2.

Для получения высокопрочных паяных соединений из однородных сталей одну из паяемых поверхностей обезуглероживают, другую насыщают углеродом (путем карбюризации), что обеспечивает направленную кристаллизацию, соединяющую заготовки. При пайке стальных изделий с широкими зазорами создание диффузионного потока углерода возможно с использованием порошков железа и чугуна (с размерами частиц до 160 мкм). На деталь с малым содержанием углерода наносится чугунный порошок, на деталь из высокоуглеродистой стали – железный. При одинаковом содержании углерода в металле деталей в стык вносится смесь указанных порошков в соотношении 50:50, при котором в паяном шве формируются поперечно ориентированные тугоплавкие частицы (кристаллы). Эффект образования сросшихся частиц наполнителя усиливается при использовании смеси порошков железа и чугуна в соотношении 30:70. В этих условиях в шве создаются прочные связи (каркас) между частицами наполнителя и паяемым металлом [11].

В качестве припоев может быть использована смесь из порошков меди или ее сплава (15 % марганца), железа и чугуна (наполнителя). При соотношении меди и наполнителя 50:50, температуре пайки 1125 °С и выдержке при этой температуре 15 мин прочность соединения на срез может достигнуть 200 МПа.

При пайке тонкостенных изделий принимают меры по снижению растворимости паяемого металла: уменьшают паяльный зазор, температуру и сокращают время пайки.

Характер физико-химического взаимодействия основных компонентов припоя и паяемого металла определяется диаграммами их состояния. Наиболее активное взаимодействие атомов расплава припоя и паяемого металла наблюдается, когда они образуют химическое соединение. Меньшая интенсивность взаимодействия наблюдается при образовании неограниченных твердых растворов, еще меньше интенсивность – при образовании ограниченных твердых растворов. Если металлы не смешиваются в жидком состоянии, то они не взаимодействуют при пайке.

Растворный процесс массопереноса элементов твердого металла в жидкий сопровождается встречным диффузионным потоком элементов жидкого металла в объем твердого и имеет крайне неравномерный характер. Различают три типа диффузии: поверхностную, обеспечивающую растекание жидкого металла; граничную, обеспечивающую проникновение элементов расплава в глубь твердого металла по границам зерен; объемную.

Граничная диффузия наблюдается при пайке поликристаллических металлов (стали) с четко выраженными границами жидкотекучими припоями (медью). Повышенная проницаемость границ зерен обусловлена повышенной диффузионной подвижностью самой границы и существованием вокруг границ зерна области с повышенной диффузионной проницаемостью. Элементы с малым радиусом (углерод, бор) легко диффундируют в паяемый металл

преимущественно по границам зерен, образуя эвтектики, охрупчивающие металл. Диффузия углерода в паяемый металл приводит к образованию карбидов по границам зерен. В результате плавления образующегося твердого раствора по границам зерен происходит расширение диффузионных клиньев.

Объемная диффузия элементов жидкого металла в твердый приводит к образованию в поверхностном слое металла диффузионной зоны, имеющей повышенную концентрацию диффундирующего элемента, уменьшающуюся в глубину металла. Глубина диффузии

$$x(t) = 2b\sqrt{Dt},$$

где b – константа, зависящая от концентрации элемента на границе взаимодействия; D – коэффициент диффузии элемента жидкого металла в твердом; t – время.

Увеличение температуры и длительности процесса пайки, а также последующая термообработка приводят к активизации объемной диффузии, влияющей на состав и структуру диффузионной зоны. Зависимости коэффициента углерода в железе от температуры и легирующих элементов представлены на рис. 3 и 4.

В результате объемной диффузии в приграничной области происходит образование твердых растворов или химических соединений. Твердые растворы представляют собой ту же фазу, что и паяемый металл. Интерметаллидные химические соединения являются новыми фазовыми образованиями, хорошо видимыми при металлографическом анализе. В некоторых случаях химические соединения могут иметь меньший удельный объем, чем исходный металл, тогда на границе двух металлов возникают растягивающие напряжения, что приводит к охрупчиванию зоны или к ее разрушению. Так, олово способно интенсивно проникать в сталь с образованием интерметаллидов, что вызывает разрушение стали. Олово способно образовывать химические соединения с большинством из компонентов различных сталей.

При науглероживании стали свыше 0,5 % происходит процесс карбидообразования, приводящий к снижению длительной прочности аустенитных сталей из-за зарождения трещин в хрупком поверхностном слое, особенно в сталях с 2–3 % углерода.

Приведенные закономерности растворно-диффузионных процессов при пайке металлов определены при стационарном состоянии расплава припоя в паяльном зазоре. В большинстве случаев расплав припоя при пайке находится в подвижном состоянии. В процессе затекания расплава припоя в паяльный зазор происходит его быстрое насыщение элементами паяемого металла с последующей изотермической кристаллизацией фронтального участка припоя, что ограничивает глубину затекания припоя в зазор при капиллярной пайке. Заполнение широкого паяльно-

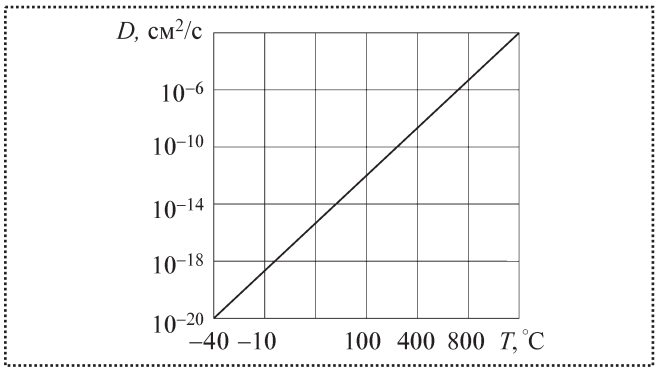

Рис. 3. Зависимость коэффициента диффузии углерода в железе от температуры

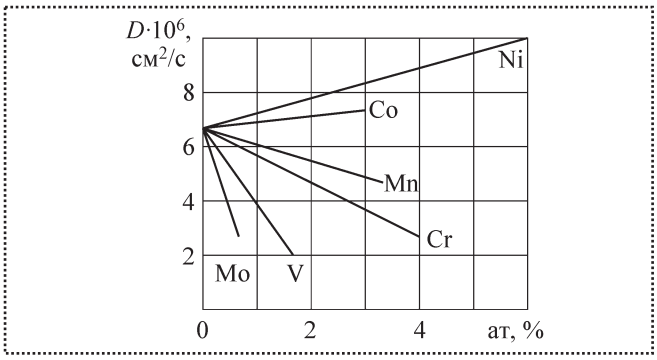

Рис. 4. Влияние легирования железа на коэффициент диффузии углерода при 700 °С

го зазора расплавом припоя сопровождается его перемешиванием с равномерным распределением растворенных компонентов по всему объему расплава независимо от ширины зазора. Такая же закономерность наблюдается при перемешивании расплава припоя под воздействием электромагнитных сил в широком зазоре (индукционная пайка). Повышение скорости перемещения расплава приводит к тому, что на протекании растворного процесса начинает сказываться влияние обеих стадий: переход атомов паяемого металла в расплав и диффузия в нем. Влияние скорости перемещения расплава на кинетику растворения (см. рис. 2), когда процесс регулируется диффузией, объясняется тем, что константа скорости растворения зависит от толщины пограничного слоя. Увеличение скорости перемещения расплава приводит к уменьшению его толщины и соответственно к увеличению скорости растворения.

Движение расплава оказывает влияние на скорость растворения твердого металла в нем лишь до некоторого значения скорости, начиная с которой пограничный слой достигает некоторой минимальной толщины и процесс растворения будет определяться переходом атомов через границу контакта металлов. Замена стадий, контролирующих процесс растворения, может также происходить при повышении температуры – диффузия уже не будет контролировать (тормозить) процесс растворения, и основную роль начнет играть переход атомов через межфазную границу.

Особый интерес представляют результаты экспериментов по определению степени влияния электромагнитного поля при индукционной пайке торцевых соединений стальных планок сечением 20×50 мм с фиксированными широкими зазорами (1...3 мм) с использованием различных припоев: марганца, образующего с железом неограниченные твердые растворы, железомарганцевого припоя П87, содержащего 40 % железа, и медь, образующую с железом ограниченные твердые растворы [10]. Выдержка производилась при температурах, превышающих температуру плавления припоев на 10 и на 50 °С. Результаты экспериментов представлены в таблице.

При использовании в качестве припоя марганца и железомарганцевого сплава (припой П87) достигнуто значительное насыщение припоев железом. Концентрационное переохлаждение полученных сплавов достигло 100 °С. Предельная концентрация железа достигалась в течение 30 с. Однако вне зависимости от длительности нагрева кристаллизация припоя происходила только после прекращения процесса индукционного нагрева. В широких швах (3 мм) достигалась высокая степень равномерности распределения железа по толщине шва (рис. 5). При пайке медью также достигалась предельная насыщенность припоя железом.

В работе [4] отмечается достижение предельной насыщенности припоя с выделением избыточной фазы на основе железа при пайке стальной конструкции методом заливки в широкий (2–3 мм) зазор. Достигнута высокая плотность паяного шва и значительное увеличение прочности на срез.

При пайке металлов с поликристаллической структурой (стали), с четко выраженными границами между зернами, может протекать граничная диффузия расплава припоя, снижающая межфазную энергию и ослабляющая межкристаллитную связь. Степень ослабления возрастает при образовании на приграничных участках зерен плавящегося твердого раствора. Проникновение расплава в микрозазор между зернами происходит под действием капиллярных сил, втягивающих его и создающих на него капиллярное давление, под действием которого расплав припоя оказывает на соседние зерна расклинивающее действие.

При растворно-диффузионном процессе происходит быстрая компенсация капиллярного давления диффузией элементов припоя в паяемый металл и растворением его в расплаве припоя с сокращением или расширением межзеренного участка. Если паяемый металл и

Содержание железа в зоне сплавления и прочность торцевых швов, паяных с широкими зазорами

Припой	Температура пайки, °С	Мощность нагрева, кВт	Выдержка, с	Паяльный зазор, мм	Среднее содержание Fe, %	Временное сопротивление разрыву, МПа	Величина концентрационного переохлаждения, °С
Марганец	1 260	30	30	1	56	420	100
	1 260	30	30	2	54	460	100
	1 260	30	30	3	50	410	85
	1 260	30	60	2	55	430	100
	1 260	30	60	3	53	420	96
	1 350	38	60	2	73	550	100
П-87	1 145	18	30	1	41	390	–
	1 145	18	–	2	40	390	–
	1 145	18	30	2	43	390	–
	1 145	18	60	2	51	460	–
	1 145	18	30	3	47	440	–
	1 200	23	30	2	60	560	80
	1 200	23	60	2	71	580	100
Медь	1 090	15	30	1	3,3	450	–
	1 090	15	30	2	2,3	440	–
	1 090	15	30	3	2,3	460	–
	1 090	15	60	1	3,2	470	–
	1 090	15	60	2	2,3	480	–
	1 090	15	60	3	3,4	420	–

припой не обладают взаимной растворимостью, активность сил капиллярного давления

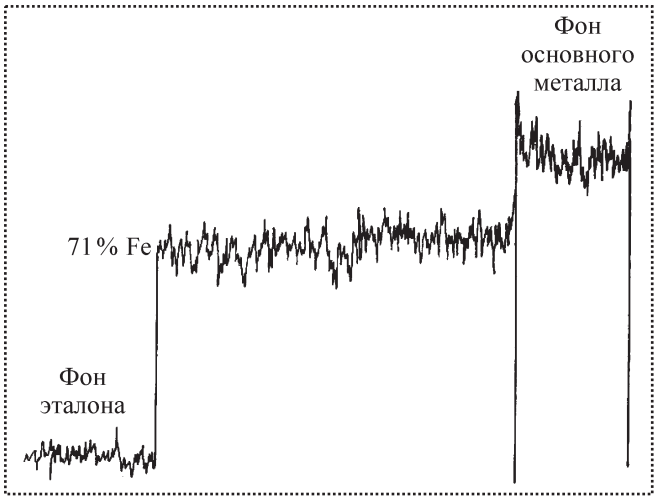

Рис. 5. Распределение железа по шву шириной 3 мм при пайке марганцем с индукционным нагревом и выдержкой 30 с

на поверхность зерен не снижается вплоть до отделения зерна или блока зерен, которые отходят от поверхности паяемого металла на расстояние, при котором уравновешиваются все силы, действующие на зерно [12].

Такой эффект самопроизвольного диспергирования наблюдается при взаимодействии железа и вольфрама с расплавами, практически не растворимыми в них: армко-железа со свинцом при 1 000 °С; вольфрама с оловом при 930 °С, с медью при 1 120 °С (рис. 6) и марганцем при 1 500 °С (в среде водорода) [14].

С увеличением времени выдержки температуры пайки число переходящих в расплав частиц резко возрастает и при капиллярном зазоре через короткий промежуток времени (при взаимодействии вольфрама с оловом – 1 мин)

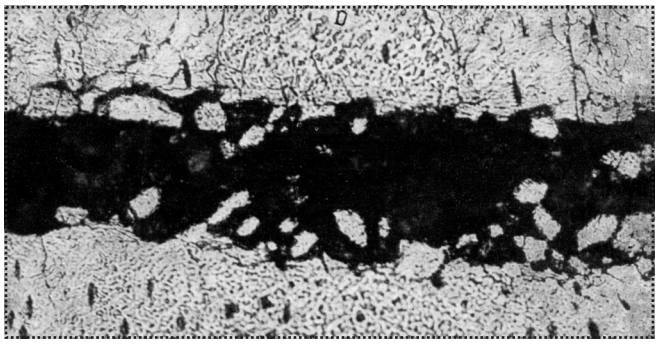

Рис. 6. Диспергирование вольфрама при пайке медью (марганцем), ×150

частицы полностью перекрывают зазор. Если в зазоре успевает произойти частичное жидкофазное спекание (соединение) дисперсных частиц, то повышается прочность паяного соединения. При соответствующей длительности выдержки температуры пайки произойдет полное исчезновение расплава.

На интенсивность диспергирования паяемого металла влияют тепловой и диффузионные потоки в паяльном зазоре. При взаимодействии железа с расплавом свинца интенсивный теплоотвод в одной из деталей способствует процессу диспергирования только на паяемом металле с более высокой температурой. При пайке углеродистой стали медью и латунью перемещение диспергированных частиц направлено по диффузионному потоку углерода в расплав.

Активность миграции атомов жидкого припоя по границам зерен возрастает с уменьшением атомных размеров. Дисперсность частиц вольфрама резко снижается при замене в припое меди на серебро, серебра на олово, олова на марганец. При взаимодействии вольфрама с марганцем в расплав переходят более крупные частицы, чем при пайке медью. Интенсивность процесса диспергирования паяемого металла резко возрастает при подвижном состоянии расплава. Резко сокращается время отрыва и перевода частиц в расплав припоя, в котором происходит растворение и равномерное насыщение всего припоя, вне зависимости от ширины паяльного зазора.

Процесс диспергирования имеет температурно-временной характер. Процесс начинает происходить только при перегреве на 50–100 °С и для его завершения требуется значительное время (несколько часов).

При пайке вольфрама припоями на основе никеля при температуре менее 1 250 °С, ненамного превышающей температуру плавления припоя, диспергирования не происходило даже при выдержке 20 мин. При этих температурах активность атомов жидкого металла не настолько велика для их эффективного проникновения по границам микроблоков. При температуре 1 280 °С появляется сетка микротрещин по границам зерен, что свидетельствует о начале процесса диспергирования. Через 13 мин от паяемого металла отделяется небольшое количество вольфрамовых частиц размером 3–13 мкм, которые переходят в расплав припоя. При температуре 1 300–1 350 °С и после выдержки 10 мин частицы полностью перекрывают зазор 0,05 мм. Переход большого количества вольфрамовых частиц в расплав припоя и их растворение в нем при кристаллизации припоя приводят к выпадению вольфрамовой фазы в центре шва.

Использование процесса диспергирования паяемого металла под действием несплавляемых с ним расплавов припоя открывает широкие возможности получения высокопрочных соединений. Процесс диспергирования выполняет основную роль по формированию благоприятной структуры паяного шва с высокими механическими свойствами при автовакуумной пайке крупных изделий с широкими паяльными зазорами, заполняемыми металлическим наполнителем [13].

Величина частиц наполнителя составляет 0,1...0,5 мм. Металл шва, сформированный с использованием такого наполнителя имеет гетерогенную структуру и низкие пластические свойства. Их можно повысить до уровня свойств паяемого металла подбором составов припоя, наполнителя и режима нагрева, при котором взаимодействие расплава припоя и

наполнителя будет приводить к диспергированию частиц наполнителя и к образованию однородной мелкозернистой структуры с размером частиц в пределах 5–20 мкм.

Активность процесса диспергирования зависит от состава припоя, в качестве которого применяют медь и медно-марганцевые сплавы, которые по возрастанию активности можно расположить в следующей последовательности: медь–марганец, медь–марганец–никель, медь–цинк (латунь).

Причиной диспергирования частиц порошка припоя является искажение кристаллической решетки наполнителя при проникновении в нее атомов припоя, приводящее к увеличению ее параметров и к возникновению в ней растягивающих напряжений. Поэтому с целью активизации процесса припой легируют элементами с большим, чем у железа (наполнителя), атомным радиусом. Легирующий элемент должен быть растворим в железе и иметь радиус атома более 0,126 нм. Активные карбидообразующие элементы не участвуют в процессе диспергирования.

Увеличение параметров кристаллической решетки металла при диффузии в него элементов припоя приводит к увеличению его объема, в результате чего на выпуклых участках частиц наполнителя возникают напряжения, приводящие к отрыву зерен от поверхности металла и переводу его в расплав припоя [9].

Следовательно, активность диспергирования повышается с уменьшением радиуса кривизны поверхности частиц наполнителя, т.е. с уменьшением их размеров, при снижении содержания в них углерода, а также с повышением температуры расплава припоя. Варьируя эти параметры припоя и наполнителя, и режим пайки, можно легко управлять процессом формирования паяного шва в широком паяльном зазоре и получать однородную равновесную мелкодисперсную структуру, обеспечивающую равнопрочность металла шва и паяемого металла.

Библиографический список

1. **Машкова Т.М.** Влияние флюса на поверхностное натяжение припоев // Сварочное производство. 1975, № 7.

2. **Ниженко В.Н., Флока Л.И.** Поверхностное натяжение жидких металлов и сплавов: справочник. М., 1981.

3. **Охрупчивание** сталей типа ВНС55 при пайке припоем на основе меди / О.В. Широков и др. // Физика и химия обработки металлов. 1991. № 5.

4. **Пайка** с принудительным формированием шва при некапиллярных зазорах. / И.Е. Петрунин и др. // Сварочное производство. 1983. № 8.

5. **Пайка** чугуном. / Л.Л. Гржимальский и др. Сварочное производство. 1986. № 3.

6. **Петрунин И.Е.** Физико-химические процессы при пайке. М., 1972.

7. **Попель С.И.** Кинетика растекания расплавов по твердой поверхности и кинетика смачивания. Сварочное производство. 1976. № 1.

8. **Радзиевский В.Н.** О растворении, осаждении стали при высокотемпературной пайке медными припоями // Сварочное производство. 1997. № 8.

9. **Радзиевский В.Н.** Влияние диспергирования наполнителя из железного порошка // Автоматическая сварка. 1997, № 2.

10. **Свойства** и структура соединений, полученных при индукционной пайке сталей / М.Х. Шорошоров и др. / Сварочное производство. 1988, № 4.

11. **Уполовникова Г.Н.** Пайка стальных деталей с большими зазорами. Сборник: ресурсосберегающие технологии, качество и надежность паяных соединений. М., 1988.

12. **Чуларис А.А.** Теоретические основы диспергирования при жидкофазном взаимодействии. Сборник: современные проблемы сварочной науки и технологии. Ростов-на-Дону, 1993.

13. **Шапиро А.Е.** Интенсивность растворения железного порошка в медном припое // Автоматическая сварка. 1997, № 2.

14. **Эффект** диспергирования при пайке железа и вольфрама. Смачиваемость и поверхностные свойства расплавов и твердых тел / В.С. Новосадов и др. Киев, 1972.

УДК. 621.79:669.2

О.Г. Быковский, *д-р техн. наук*
(Запорожский национальный технический университет, Украина)
E-mail: ershov@zntu.edu.ua

Современное состояние технологии сварки цветных металлов и сплавов (обзор*). *Продолжение***

Проанализированы основные трудности, связанные со свариваемостью медных сплавов, никеля и его сплавов, а также свинца (наличие оксидной пленки, пористость, склонность к образованию горячих и холодных трещин, обеспечение равнопрочности) и пути их преодоления как на стадии предварительной подготовки изделий под сварку, так и во время сварочного процесса. Приведены отечественные и зарубежные сварочные материалы, а также способы и технологические рекомендации по сварке этих сплавов. Рассмотрены современные тенденции по совершенствованию свариваемости, технологии и техники изготовления сварных металлоконструкций из медных, никелевых сплавов и свинца.

The article the main problems connected with welding capacity of copper and copper alloys, nickel and nickel alloys and lead (oxide film, weld porosity, inclination to form hot-tearing and cooling cracks equivalent solid) and the ways that help to overcome them both on stage to preliminary prepare of wares before welding and during of the welding process are analyzed.

The fatherland and foreign welding materials are presented as the methods and technological recommendations by the welding this alloys are given too. Modern tendencies on perfection welding capacity, technology and technique of manufacture from copper, nickel alloys and lead welded constructions are examined.

Ключевые слова: сварка, цветные металлы, медь, латунь, бронза, никель, монель, оксидная пленка, свариваемость, электрод, импульсный ток, металл шва, присадочные материалы.

Keywords: welding, non-ferrous metals, copper, brass, bronze, nickel, monel, oxide film, welding capacity, electrode, current pulses, welded metal, welding materials.

4. Медь и ее сплавы

Медь и сплавы на ее основе широко используются во многих отраслях экономики, где требуется сочетание таких важных свойств, как прочность, тепло- и электропроводность, высокая коррозионная и эрозионная стойкость, антифрикционные свойства и т.п.

Медь используется для изготовления электрораспределительных приборов, электрических машин и аппаратов, теплообменных аппаратов, водоохлаждаемых кристаллизаторов, в криогенной технике и т.д.

Свариваемость меди в значительной степени определяется наличием в ней примесей, наиболее вредной из которых является кислород. Последний образует с медью закись Cu_2O, что способствует появлению эвтектики $Cu+Cu_2O$, снижающей стойкость против образования горячих трещин.

Вместе с этим образуется и оксид меди CuO, тугоплавкое и не растворимое в меди соединение, засоряющее сварочную ванну.

При наличии в меди растворенного водорода протекает его реакция с закисью меди с образованием паров воды, не успевающих выделиться из жидкого металла и накапливающихся в кристаллической решетке. Создавая там большое давление, пары воды способствуют образованию холодных трещин; это явление носит название "водородной болезни". Поэтому содержание кислорода в меди не должно превышать 0,01 %.

Вредными примесями, способствующими образованию горячих трещин, являются висмут, сурьма и свинец, содержание которых не должно превышать 0,003, 0,005 и 0,03 % соответственно.

Причиной пористости сварных швов может быть водород: вследствие скачкообразного изменения его растворимости при переходе металла из жидкого состояния в твердое и быстрой кристаллизации он не успевает выделиться из сварочной ванны. Применение предварительного, а иногда и сопутствующего подогрева позволяет увеличить длительность пребывания сварочной ванны в жидком состоянии и способствует выделению водорода.

* Составлен на основе анализа рекомендованной литературы и статей в периодических изданиях за последние 25 лет.

** Начало в № 9, 10, 2011.

Эти меры направлены также и на преодоление трудности, связанной с большой теплопроводностью меди, когда на начальной стадии сварки затрудняется образование сварочной ванны, что приводит к непровару.

Относительно влияния азота на пористость меди единой точки зрения нет. Считается, что при поглощении металлом азота из плазменной струи и последующего его выделения в объеме сварочной ванны могут возникать поры при значениях сварочного тока более 220 А, а при меньших его величинах поры отсутствуют. В то же время при сварке меди погруженной дугой в азотной защитной атмосфере пористость отсутствует вследствие горения дуги в парах металла.

Высокий коэффициент линейного расширения вызывает не только деформации в свариваемом изделии, но и трещинообразование вследствие пропорционального действия остаточных напряжений растяжения при охлаждении и коэффициента линейного расширения. Именно эти два показателя связываются с провалом прочности меди в интервале температур 250...550 °С. Поэтому необходимо избегать жесткого закрепления конструкции во время сварки, тем более, что за счет высокой пластичности меди деформированное изделие легко поддается правке после сварки.

Сварочная ванна обладает высокой жидкотекучестью, поэтому необходимо ограничивать ее объем и применять различные формирующие устройства, чаще всего из графита. Заготовка деталей должна выполняться механическим инструментом, после термической резки обязательна механическая зачистка; свариваемые кромки и присадочная проволока зачищаются до металлического блеска стальными щетками и обезжириваются ацетоном или уайт-спиритом, флюс и покрытые электроды требуют прокалки перед сваркой.

Газовая сварка меди используется, главным образом, при ремонтных работах или при изготовлении тонкостенных изделий и выполняется мягким нормальным ацетиленокислородным пламенем.

В качестве присадки применяют проволоку разных марок в соответствии с ГОСТ 16130–90: МСр-1, МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 и др., в которых содержатся активные раскислители – P, Al, Si, Mn. Если присадочная проволока не содержит фосфора и кремния, обязательно применение флюсов, которые растворяют оксиды, переводят их в легкоплавкий шлак и защищают расплавленный металл от дальнейшего окисления. Флюс наносится на свариваемые кромки и прутки в виде пасты, в которой компоненты растворены в дистиллированной воде или спирте. Сварка ведется восстановительной зоной пламени, присадочная проволока все время находится в сварочной ванне; ею обрабатывается и перемешивается жидкий металл. Сварка ведется в нижнем положении под углом 7–10° к горизонтали для лучшего заполнения разделки. После сварки требуется проковка. Для придания сварному шву большей вязкости после проковки его вместе с околошовной зоной нужно нагреть до температуры 600 °С и быстро охладить в воде.

Ручная дуговая сварка графитовым электродом применяется для сварки меди толщиной до 15 мм, если для сварного изделия была применена нераскисленная медь, на постоянном токе прямой полярности. В качестве присадки используются прутки из бронз БрОФ 9-0,3, БрКМц 3-1 и флюса.

Сварка ведется длинной дугой на подъем, присадка не погружается в сварочную ванну, а находится на расстоянии 5–6 мм от ее поверхности. Перед сваркой начало шва подогревается без подачи присадочной проволоки. Механические и коррозионные свойства сварных швов могут быть достаточно высокими.

Ручная дуговая сварка плавящимся покрытым электродом используется для сварки металла любых толщин при соответствующей подготовке кромок на постоянном токе обратной полярности. Применяются покрытые электроды марок "Комсомолец 100" и ОЗБ со стержнем из меди М1. Разработанные в ИЭС им. Е.О. Патона электроды марок АНЦ-1, АНЦ-2, АНЦ-3 и ОЗМ-3 благодаря наличию экзотермических компонентов в покрытии обеспечивают возможность сварки металла толщиной до 15 мм без предварительного подогрева.

Металл шва, наплавленный перечисленными марками электродов, равноценен по своим характеристикам основному металлу. Электроды марок ЗТ и ОК94.55* имеют стержни из бронзы КМц 3-1, а ОК94.25* обеспечивает получение наплавленного металла типа оловянистой бронзы. Все они не обеспечивают равноценные механические и специальные свойства сварных швов.

Ручная дуговая сварка вольфрамовым электродом в защитных газах выполняется на постоянном токе

* Продукция фирмы "ESAB", Швеция.

прямой полярности для всех видов сварных соединений во всех пространственных положениях. В качестве присадки наряду с проволоками марок БрКмц 3-1 и МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 рекомендуются специальные комплексно легированные проволоки марок МРзТБ 0,1-0,1-0,008 и МРзТЦрБ 0,1-0,1-0,1, содержащие эффективные раскислители. В зависимости от толщины стенки необходим предварительный подогрев до 500 °С. При сварке металла толщиной 0,3...2,5 мм эффективна импульсно-дуговая сварка без присадки с подачей импульсов переменного тока с определенной частотой. В качестве защитных газов используются аргон и особо чистый азот.

Автоматическая сварка вольфрамовым электродом применяется чаще всего для выполнения кольцевых неповоротных стыков. В качестве защитного газа используется гелий, который подается и вовнутрь трубы. Вначале производится подогрев участка длиной 10...20 мм, находящегося в потолочном положении, а после образования сварочной ванны подается присадочная проволока.

Если сварка выполняется в особо чистом азоте, в качестве присадки используется только проволока из сплава МНЖКТ 5-1-0,2-0,2, а процесс ведется при длине дуги, большей в 2–2,5 раза по сравнению с инертными газами.

Плазменная сварка благодаря высокой концентрации тепловой мощности позволяет сваривать стыковые соединения меди толщиной до 60 мм без разделки кромок. В качестве плазмообразующего газа применяется смесь аргона и гелия, а для защиты сварочной ванны и хорошего формирования шва применяется флюс марки АН-26С. В качестве присадочной используется специальная порошковая проволока марки ПП-БрХТ-1,2-0,2, содержащая раскисляющие и легирующие элементы. Особенно эффективно применение микроплазменной сварки тонкостенных труб из меди и медных сплавов; в этом случае плазмообразующим газом является аргон, а защитным – гелий.

Механизированная сварка плавящимся электродом выполняется на постоянном токе обратной полярности и характеризуется большей в 2–3 раза производительностью по сравнению со сваркой неплавящимся электродом. Однако стабильность горения дуги в этом случае хуже, как и возможность получения беспористых швов. Процесс сварки в чистом азоте достаточно стабильный, но имеет место повышенное разбрызгивание. При сварке больших толщин рекомендуется вести процесс в газовой смеси 70...80 % Ar + 30...20 % N_2, однако шов лучше формируется при сварке в инертных газах. В качестве присадки используется проволока МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 и только для конструкций с малой жесткостью можно применять проволоку из бронзы БрКМц 3-1.

Для сварки в среде аргона можно рекомендовать медную проволоку марки OK Autrod 19.12* (0,2 % Si, 0,2 % Mn, 0,8 % Sn, остальное – Cu). При полуавтоматической сварке диаметр электродной проволоки должен быть не более 1,4 мм. Перед сваркой необходим предварительный подогрев кромок до 500 °С.

Автоматическая сварка меди толщиной до 10 мм под флюсом выполняется как с применением стандартных плавленых флюсов для сварки сталей (АН-348А, АН-20С), так и керамического флюса ЖМ-1. Для больших толщин следует применять специальный флюс сухой грануляции марки АНМ-13. Присадочная проволока выбирается в зависимости от марки флюса: так, для флюсов АН-348А, АН-20С рекомендуются проволоки марок М1, БрКМц 3-1, БрОЦ4-3; для керамического флюса ЖМ-1 – проволоки М1, М2; для флюса АНМ-13 – проволоки М1, БрХТ 0,6-0,5. Прихватки должны быть выполнены теми же проволоками, что и сварка. Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе.

Сварка начинается на технологической планке при возбуждении дуги между электродом и изделием через медную или латунную обезжиренную стружку. При отсутствии планки необходим предварительный подогрев до 300 °С. Сварка ведется на графитовой или флюсовой подушке за один проход с полным проваром соединяемых кромок.

Служебные характеристики металла шва зависят от состава электродного металла и марки флюса. Так, при использовании комбинации флюсов ЖМ-1 и АНМ-13 с проволокой М1 свойства сварного шва практически аналогичны таковым основного металла, а в остальных рассмотренных ранее случаях электропроводность и теплопроводность снижены.

Электрошлаковая сварка меди наиболее целесообразна при изготовлении изделий с большим поперечным сечением без разделки кромок. Для этой цели применяется пластинчатый электрод или плавящий-

* Продукция фирмы "ESAB", Швеция.

ся мундштук, изготовленные из того же материала, а также сварочные проволоки марок БрКМц 3-1 и БрОЦ 4-3 и специальный легкоплавкий флюс марки АНМ-10 на основе фторидов щелочноземельных металлов. Замедленное охлаждение зоны термического влияния хотя и увеличивает размер зерна в ней, однако благодаря благоприятному срастанию кристаллитов при вертикальной сварке отсутствует зона слабины, характерная для металла, сваренного дуговым способом в нижнем положении. Механические свойства металла шва практически не отличаются от свойств основного металла.

Электронно-лучевая сварка затруднена интенсивным испарением металла в вакууме при перегреве выше температуры плавления и его высокой теплопроводностью.

Из-за высококонцентрированной мощности луча вследствие потерь на испарение ослабляется сечение шва при сварке тонколистового металла, а при сварке металла больших толщин происходит его разбрызгивание и ухудшается формирование шва. Поэтому тонколистовой металл сваривается расфокусированным лучом или колеблющимся пучком, а при сварке меди больших толщин применяются электронно-оптические системы, обеспечивающие равномерность распределения тепла по сечению пучка при большом тепловложении.

В последнем случае обеспечивается получение мелкозернистой структуры со свойствами, близкими к показателям основного металла.

Электрическая контактная сварка меди затруднена вследствие ее высокой электро- и теплопроводности, а также узкого диапазона температур, в котором металл может свариваться давлением.

Перед сваркой поверхности обрабатываются механическими и химическими способами. Точечная и шовная сварка выполняются на особенно жестких режимах с обязательным использованием тепловых экранов из коррозионно-стойкой стали толщиной 0,25–0,35 мм между электродами и деталями или металлокерамических электродов (вставок) из молибдена или вольфрама для уменьшения стока тепла в электроды. Другой способ предполагает при сварке медных пластин толщиной 0,2, 0,5 и 1,0 мм размещение между ними порошкообразной прослойки из самофлюсующегося сплава ПГ-СР с высоким электрическим сопротивлением. Благодаря большому контактному сопротивлению прослойка расплавляется с вытеснением продуктов на периферию, что интенсифицирует конвективный разогрев основного металла в зоне сварки. Поверхностные пленки, оксиды полностью разрушаются и перераспределяются в жидком металле ядра, а нерастворимые соединения концентрируются на его периферии. Их остатки нейтрализуются легирующими компонентами прослойки – марганцем, кремнием и бором, обеспечивая формирование качественного ядра точки.

Стыковая сварка сопротивлением выполняется при концентрированном нагреве контактной зоны и больших скоростях осадки – 120...150 мм/с.

При сварке оплавлением требуется особая техника ведения процесса: очень важно поддерживать на торцах свариваемых деталей слой жидкого металла и прогревать их на значительную глубину для дальнейшей осадки, которую лучше осуществлять под током.

Сварка в твердой фазе лучше всего выполняется в холодном состоянии.

Холодная точечная сварка меди принципиально не отличается от сварки алюминия, но требует значительно большей степени деформации для получения необходимого провара, что отражается на большей высоте пуансонов, обеспечивающих большее углубление и периферийный провар.

В связи с глубоким деформированием меди возникает значительное коробление, и при сварке одиночными точками последующая точка может разрушить предыдущую точку. Поэтому необходимо применять либо многоточечную сварку, либо предварительно обжимать зону сварки в специальных приспособлениях. Оптимальная свариваемость достигается при ширине прямоугольных пуансонов, близкой к толщине свариваемых листов или при круглых пуансонах, когда их диаметр равняется двум толщинам свариваемых листов.

Предпочтение нужно отдавать узким прямоугольным или эллиптическим пуансонам, интенсивно деформирующим место сварки и более равномерно передающим на него удельные давления без значительного коробления изделия.

Предварительный отжиг меди позволяет получить показатели свариваемости на уровне наклепанного металла, но со значительно меньшими усилиями сжатия.

Холодная стыковая сварка меди требует гораздо больших усилий осадки и зажатия деталей по сравнению с алюминием. Наибольшие удельные давления при этом достигают 2200...2500 МПа, поэтому для обеспечения достаточных усилий зажатия деталей с большим сечением нужно применять меха-

низмы жесткой клиновой системы с предварительным торцевым поджатием клиньев и рифленой поверхностью зажимающих частей.

Сварка трением меди может выполняться как традиционным способом, так и по получающей все большее распространение схеме сварки трением с перемешиванием. В последнем случае можно не только сваривать медь и ее сплавы, но и наплавлять на ее поверхность другие медные сплавы, например, латунь в виде пластины. Путем последовательного выполнения прорезных швов можно получить наплавленный слой медного сплава.

Диффузионная сварка меди в вакууме выполняется для получения ваккумно-плотных швов.

Сварка ведется с нагревом в пределах 100...700 °С и давлением 50...80 МПа, причем влияние одного из этих параметров на скорость процесса возрастает с увеличением другого вследствие снижения энергии активации ползучести меди.

Ультразвуковая сварка позволяет получить соединения меди с высокими значениями статической прочности на срез и отрыв на уровне этих свойств у основного металла при оптимальном шаге между точками. Способ позволяет соединять тонкие и сверхтонкие детали, например, медные проволоки диаметром 0,3 мм, покрытые лаковой изоляцией, к клеммной коробке без зачистки изоляции.

Латуни – это медноцинковые сплавы: при содержании цинка до 39 % – это однофазные α-латуни, при большем содержании цинка – это двухфазные $\alpha+\beta$-латуни или β-латуни. Это самые распространенные медные сплавы, они делятся на обрабатываемые давлением и литейные. Все трудности, присущие сварке меди, остаются действующими и при сварке латуней, однако различие сплавов по их составам требует индивидуальных подходов к оценке их свариваемости.

Общим фактором, ухудшающим свариваемость латуней, является испарение цинка (температура плавления большинства сплавов близка к 900 °С, в то время как температура кипения цинка равна 905 °С). Поэтому при использовании многих способов сварки, если не принять необходимых мер, потери этого элемента могут доходить до 25 %, что влечет за собой изменение состава, структуры и свойств сварного шва при крайне тяжелых условиях труда сварщика. При сварке многопроходных швов трудно рассчитать состав наплавленного металла и учесть влияние термической обработки предыдущих валиков шва, которая действует при наложении последующих. В последнем случае возможны полиморфные превращения в твердом состоянии – распад твердых растворов с выделением новых фаз и плавлением эвтектик, что иногда приводит к охрупчиванию сварных швов. Поэтому для уменьшения испарения цинка необходимо применять присадочные проволоки и прутки, содержащие кремний и алюминий, создающие на поверхности сварочной ванны слой из плотной пленки, которая в значительной мере препятствует испарению цинка.

При охлаждении после сварки появляются растягивающие напряжения как в сварном шве, так и в зоне термического влияния, вследствие чего возникает угроза коррозионного растрескивания при эксплуатации. Это явление можно предупредить: в сварном шве – уменьшением содержания цинка и легированием, а в основном металле – термической обработкой: полной или местной. При небольшом объеме сварки термическую обработку можно заменить послойной проковкой швов.

Газовая сварка латуней применяется при изготовлении конструкций с толщиной стенки 0,5...2,5 мм и при ремонтных работах. Дополнительные трудности возникают в связи с активным поглощением сварочной ванной газов, повышенной склонностью металла шва и зоны термического влияния к трещинообразованию и значительная деформация изделия. Сварка ведется окислительным ацетиленокислородным пламенем для уменьшения растворения водорода в жидком металле и снижения интенсивности испарения цинка. Присадочными металлами являются кремнийсодержащие и самофлюсующиеся сплавы, в качестве флюса применяется прокаленная бура. Заварка дефектов литья производится присадочными прутками того же самого состава.

Газопламенная наплавка латуней производится на уплотнительные поверхности арматуры из сталей и чугуна, используются многие сплавы, кроме кремнистых латуней, не обеспечивающих прочное соединение латуней со сталью вследствие образования хрупкой зоны сплавления. Перед наплавкой деталь подогревается до температуры 500...900 °С, на наплавляемую поверхность наносится порошкообразный флюс, после чего производится лужение слоем 0,3...0,5 мм, а дальнейшие валики наплавляются до получения нужной высоты слоя.

После наплавки каждого слоя его нужно проковать при температуре 750...800 °С.

Ручная дуговая сварка графитовым электродом выполняется на постоянном токе прямой полярности и применяется при изготовлении изделий из свинцовистых латуней и заварке дефектов литья многих марок латуней. Сварка выполняется либо на остающихся подкладках из того же металла, либо на съемных из графита с помощью скользящих креплений.

Перед сваркой металл толщиной более 12 мм подогревается в начале шва до температуры 250–300 °С, после образования сварочной ванны в нее вводится присадочный латунный пруток с флюсами на основе буры или хлористых и фтористых солей. Сварка ведется предельно короткой дугой, электрод периодически погружается в сварочную ванну, процесс ведется быстро, без обрывов дуги. После сварки производится термическая обработка – отжиг.

Ручная дуговая сварка покрытым электродом выполняется на постоянном токе обратной полярности, в качестве стержня применяются прутки из латуни, а также кремнистой или алюминиевой бронзы с покрытиями различного типа. При сварке металла толщиной более 12 мм требуется предварительный подогрев до 300 °С. При больших размерах вырубленных участков литья вначале наплавляются кромки, а потом уже весь участок. Если в изделии возникает деформация, проковке подвергается каждый валик за исключением верхнего слоя. После сварки выполняется термическая обработка – отжиг, однако механические свойства сварных соединений уступают этим показателям основного металла.

Ручная дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде аргона рекомендуется для сварки металла толщиной до 12 мм и выполняется с применением прутков из кремнистой и алюминиевой бронзы. В первом случае процесс ведется на постоянном токе прямой полярности, во втором – на переменном токе. Во всех случаях прихватка и сварка должны выполняться присадкой одного состава. При толщине металла более 5 мм необходим предварительный подогрев до температуры 200...300 °С. Этот способ обеспечивает получение металла шва, равноценного основному металлу сварного соединения.

Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в защитных газах пригодна для всех видов сварных соединений толщиной 3...20 мм на постоянном токе обратной полярности. В качестве присадки рекомендуются проволоки МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 и БрАМц 9-2. В основном этот способ рекомендуется для заварки крупных дефектов латунного литья. Процесс нужно вести очень быстро для уменьшения испарения цинка, а для предупреждения коррозионного растрескивания необходима термическая обработка или проковка швов.

Автоматическая сварка под флюсом выполняется для всех видов соединений толщиной 4–20 мм. Применяются сварочные проволоки из бронз марок БрКМц 3-1, БрОЦ 4-3 и БрАМц 9-2 в сочетании с флюсами АН-20 и ФЦ10 на постоянном токе обратной полярности. После термической обработки получаются сварные соединения, равноценные основному металлу.

Электрическая контактная сварка латуней вследствие меньших значений электрического сопротивления по сравнению со сталями требуют больших сварочных токов и мощности машин – соответственно на 30 и 50 %.

Сварка в твердой фазе трением выполняется как традиционным способом, так и трением с перемешиванием; в последнем случае сварной шов, сваренный без дефектов, имеет повышенную на 15...20 % твердость по сравнению с основным металлом.

Диффузионная сварка латуней затруднена вследствие испарения цинка, когда имеет место вспучивание поверхности, образование пор и выбросы из них продуктов реакции взаимодействия цинка с медью. Поэтому этот способ сварки возможен только в защитной атмосфере при ее давлении на 10...20 кПа большем парциального давления пара цинка.

Изделия из **алюминиевых бронз** изготавливаются как в деформируемом виде, так и в литом состоянии, они обладают высокими механическими, антикоррозионными и антифрикционными свойствами.

Наличие оксидной пленки Al_2O_3 (ее толщина может достигать 0,5...1,0 мм на поверхности литых деталей) приводит к засорению сварочной ванны и способствует пористости сварных швов, поэтому для борьбы с ней нужно предпринимать меры, такие же, как и при сварке алюминия.

Все алюминиевые бронзы, за исключением алюминиевомарганцевых, имеют провал пластич-

ности в области температур 400...500 °С, что приводит к образованию трещин, особенно при сварке литейных сплавов. Это еще больше проявляется в условиях жесткого закрепления, поэтому надо обеспечивать повышенную скорость охлаждения в этом интервале температур, а при многопроходных швах температура предыдущих валиков перед наложением последующих должна быть ниже 200 °С. При необходимости предварительного подогрева его температура не должна превышать 200 °С.

При сварке сложнолегированных высокопрочных бронз трудно использовать механизированные способы сварки в защитных газах из-за невозможности изготовить волочением проволоку того же самого состава. Для сварки под слоем флюса применяют проволоку из бронзы БрАМц 9-2 в сочетании с керамическим флюсом, но вследствие плохой отделимости шлаковой корки трудно избежать шлаковых включений в сварном шве, что при изготовлении изделий особо ответственного назначения недопустимо. Эта проблема решается путем использования специальной композитной проволоки, которая изготавливается путем совместного волочения медной ленты (оболочки) вместе с алюминиевой, стальной, никелевой и манганиновой проволоками.

Изменяя размеры ленты и составляющих проволок, можно получить любой состав не только алюминиевой бронзы, но и любого медноникелевого сплава. Преимуществом такой конструкции является одновременное плавление всех составляющих компонентов, когда уже на стадии капли образуется сплав заданного состава. В сочетании с защитным газом можно получить многослойные швы без шлаковых включений.

Сложнолегированные алюминиевые бронзы требуют после сварки замедленного охлаждения со скоростью не более 10 °С/с, после чего для снятия остаточных напряжений надо подвергать изделия отжигу при температуре 550 °С.

Ручная дуговая сварка графитовым электродом на постоянном токе обратной полярности или на переменном токе применяется в основном для заварки дефектов литья, а также для сварки конструкций неответственного назначения при толщине металла от 3 до 20 мм. Поверхности зачищаются до металлического блеска и обезжириваются ацетоном. В качестве присадки используются литые прутки того же состава, на их поверхность наносится покрытие толщиной 0,2...0,4 мм из фтористых и хлористых солей щелочноземельных металлов. Перед сваркой металла толщиной более 10 мм требуется предварительный подогрев до 300 °С (чем толще стенка изделия, тем выше температура подогрева).

Первый шов накладывается на подкладке временной или остающейся, в процессе сварки разогретым концом присадки нужно совершать манипуляции для очищения поверхности сварочной ванны от оксидов и шлаков. Перед нанесением каждого последующего шва предыдущий должен быть тщательно очищен от шлака, иначе в последующих швах могут образоваться поры.

Ручная дуговая сварка покрытым электродом ведется на постоянном токе обратной полярности и выполняется только в нижнем или полувертикальном положениях. Получение наплавленного металла заданного сплава обеспечивается за счет литых электродных стержней и обычного покрытия или за счет использования бронзовой проволоки марки БрАМц 9-2 и легирующего покрытия (табл. 1). Скорость плавления бронзовых электродов в 1,5 раза выше, чем стальных, поэтому нужно

Таблица 1

Выбор состава электродного стержня и марки покрытия для сварки алюминиевых бронз

Состав электродного стержня	Марка покрытия	Тип наплавленного металла
БрАМц 9-2	ЛПИ АБ-1	БрАМц 9-2
БрАЖМц 10-3-1,5	ЛПИ АБ-1	БрАЖМц 10-3-1,5
БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5	ЛПИ АБ-1	БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5
БрАЖН 10-4-4	ЛПИ АБ-1	БрАЖН 10-4-4
БрАМцЖН 8-10-3-2	ЛПИ-48-МАБ-1	БрАМцЖН 8-10-3-2
БрАЖМц 10-3-1,5	ЛПИ-ИЖ-АБ-7	БрАЖНМц 7-2,5-1,5-9
БрАМц 9-2	ЛПИ-ЛКЗ-АБ-4	БрАНМцЖ 8-3-4-1,5
БрАЖМц 10-3-1,5	ЛПИ-48-АБ-5	БрАЖНМц 8,5-4-4-1,5
Композитный стержень любого состава	ЗМИ-1 (Na_3AlF_6 – 58 %, NaF – 38 %, графит – 4 %)	Любой состав

увеличивать и скорость сварки. При сварке с поперечными колебаниями необходимы мгновенные задержки на кромках соединения, особенно на V- и U-образных разделках, при тщательной очистке валиков от шлака.

Ручная дуговая сварка вольфрамовым электродом ведется на переменном токе, выполняется для всех типов сварных соединений во всех пространственных положениях как при заварке небольших дефектов литья, так и для наплавки тонких слоев бронзы с небольшим проплавлением основного металла.

Прихватку и первый проход можно выполнять с помощью прутков менее легированной бронзы марки БрАМц 9-2 или OK Autrod 19.40* (7,9 % Al, 0,1 % Mn, 0,05 % Si), однако нанесение последующих швов должно производиться присадкой того же состава, что и основной металл.

При сварке металла толщиной 10...12 мм и более применяют предварительный подогрев до 200 °С.

Механизированная дуговая сварка плавящимся электродом в среде защитных газов ведется на постоянном токе обратной полярности и применяется при изготовлении изделий любой толщины стенки, а также при ремонтных работах. Свариваемые поверхности должны быть очищены и обезжирены уайт-спиритом, ацетоном, а электродная проволока должна быть подвергнута химическому травлению или электролитическому полированию для полного удаления адсорбированной влаги. Прихватку следует осуществлять на тех же режимах и с применением той же проволоки, что и при сварке. При сварке длина дуги должна быть в пределах 3...5 мм для избежания пористости, процесс необходимо вести отдельными валиками на возможно большой скорости, каждый предыдущий валик перед наложением последующего должен быть зачищен и зашлифован для получения вогнутой или плоской поверхности; каждый последующий валик должен перекрывать предыдущий не более чем на одну треть.

Особенно перспективно применение этого способа при заварке дефектов литья, когда в качестве присадочной проволоки используется композитная проволока аналогичного состава, а отсутствие необходимости удаления шлаковой корки обеспечивает высокое качество и производительность ремонтных работ.

* Продукция фирмы "ESAB", Швеция.

Автоматическая сварка под флюсом ведется на постоянном токе обратной полярности и применяется для сварки металла толщиной 5...60 мм. Сборка под сварку выполняется вручную вольфрамовым электродом с присадкой того же состава, что и при сварке.

Для сварки алюминиевых бронз нужно использовать проволоки того же состава, что и основной металл, а также специальные керамические флюсы, которые не окисляют легирующие компоненты и лучше выводят из сварочной ванны включения оксида алюминия. Стандартные плавленые флюсы марок АН-20, АН-42 и другие не обеспечивают получение равноценных сварных соединений, хотя для некоторых конструкций их можно применять в сочетании с проволоками марок БрАМц 9-2, БрАЖ 9-4. Для лучшего газоудаления сварка ведется по слою флюса высотой 25...30 мм. Сварку высоколегированных алюминиевых бронз рекомендуется выполнять с применением электродных материалов, приведенных в табл. 2, которые обеспечивают получение равнопрочных сварных соединений.

Наплавку алюминиевых бронз применяют для придания специальных свойств поверхностному слою многих деталей машин. При этом используются сплавы меди с 10...12 % алюминия, имеющие при переходе из жидкого состояния в твердое структуру β-фазы, которая при замедленном охлаждении после 350 °С распадается на $\alpha+\gamma_2$-фазу. Однако в условиях наплавки вследствие быстрого охлаждения высокотемпературная β-фаза остается нераспавшейся и находится в метастабильном состоянии. При микроударном воздействии она способна к бездиффузионному превращению в мартенситоподобную β′-фазу, реализуя таким образом процесс самоупрочнения. Благодаря этому свойству наплавленной высокоалюминиевой бронзы можно значительно повысить износостойкость поверхностного слоя и срок службы деталей машин (латунных гребных винтов, подверженных кавитационной эрозии, узлов трения в роторных питателях целлюлозно-бумажного производства и т.д.). Плазменная наплавка с применением токоведущей проволоки обеспечивает минимальное проплавление основного металла при высоком качестве наплавленного металла. Вначале зажигается дуга между вольфрамовым электродом и соплом. С появлением плазменной струи из сопла-канала головка некоторое время работает на холостом ходу до стойкого горения дуги. После это-

Таблица 2

Материалы для автоматической сварки под флюсом легированных алюминиевых бронз

Основной металл		Сварочная проволока		Марка флюса
Марка	Толщина, мм	Марка	d_e, мм	
БрАЖМц 10-3-1,5	35	БрАЖМц 10-3-1,5	6	ЛПИ-К1
БрАНМцЖ 8,5-4-4-1,5	35	БрАМц 9-2	3	ЛПИ-К2
БрАНМцЖ 8,5-4-4-1,5	40	БрАМц 9-2	4	ЛПИ-К3
БрАНМцЖ 8,5-4-4-1,5	60	БрАМц 9-2	5	ЛПИ-К2
БрАНМцЖ 8,5-4-4-1,5	60	БрАМц 9-2	6	ЛПИ-К2
БрАЖНМц 7-2,5-1,5-9	60	БрАЖМц 10-3-1,5	6	ЛПИ-К3
БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5	40	БрАЖМц 10-3-1,5	6	ЛПИ-К4
БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5	35	АНМцЖ 8-3-4-1К (композитный)	2,8	ЛПИ-К5
БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5	60	АНМцЖ 8-3-4-1К (композитный)	2,8	ЛПИ-К5
БрАЖ 9-4, БрАМц 9-2	15	БрАМц 9-2	3	АН-60 + 17 % $CaCO_3$

го включается подача присадочной проволоки и возбуждается основная дуга между вольфрамовым электродом и проволокой. Начинается плавление присадки и переход капель расплавленного металла на поверхность изделия с образованием сварочной ванны, и растекание перегретого металла по поверхности изделия, после чего включается перемещение автомата или изделия при неподвижном автомате.

Таким образом плавление основного металла и сплавление его с наплавляемым осуществляется за счет тепла перегретых в дуге капель электродного металла и частично факела плазменной струи.

Поперечные колебания головки плазмотрона позволяют осуществлять широкослойную наплавку валиков с плавным переходом от основного металла к наплавленному. При наплавке тел вращения процесс ведется по винтовой линии, что позволяет наплавлять детали, начиная с 30 мм и более. Прочность сцепления наплавленного металла с основным находится на уровне прочности наплавленного или даже выше.

Оловянистые бронзы получают в деформируемом и литом состоянии и применяют для облицовки судовых гребных валов, подшипников скольжения и т.п.

Теплопроводность этих бронз существенно ниже теплопроводности меди, поэтому нет необходимости предварительного и сопутствующего подогрева, но все же его используют в целях избежания трещин вследствие низкой пластичности бронзы при повышенных температурах, особенно при заварке дефектов литья сложной конфигурации и при значительном перепаде толщин.

Вместе с тем подогрев нужно осуществлять осторожно, с перерывами для выравнивания температур, так как при перегреве излишнее олово, находящееся на границах кристаллов, расплавляется, нарушая связь между ними; металл разупрочняется и отливка может разрушиться под действием собственной массы.

При сварке возможна ликвация олова в связи с большим температурным интервалом кристаллизации, что влечет образование горячих трещин. Чем больше содержание олова в сплаве и скорость охлаждения, тем больше химическая неоднородность. Мерами борьбы с этим явлением являются сварка на минимальной погонной энергии с перерывами для выравнивания температуры, применение отжига заготовок, промежуточного отжига наполовину сваренного изделия и финишного отжига, применение сварочных материалов с меньшим содержанием олова. Каждый последующий валик наносится после охлаждения предыдущего до 100 °С. Часто применяется проковка свариваемых кромок, а потом наплавка и проковка уже наплавленных валиков, что снижает вероятность образования трещин в околошовной зоне и шве. Последующий отжиг полностью устраняет структурную неоднородность в шве.

Трещины в зоне термического влияния бронзы БрОЦ10-2 образуются вследствие диффузии водорода из основного металла к линии сплавления и сегрегации в ней легкоплавких примесей свинца и висмута. Предварительный отжиг этой бронзы при температуре 600 °С в течение 5 ч устраняет склонность к хрупкости за счет уменьшения начальной концентрации в основном металле и исключает сегрегацию вредных примесей; содержание последних ограничивается величиной 0,05 %.

Для ограничения интенсивного окисления сварочной ванны сварочные материалы должны содержать активный раскислитель – фосфор.

Газовая сварка применяется в основном для заварки дефектов литья. Основной трудностью является выгорание легирующих элементов и олова; испарение последнего приводит к пористости и снижению механических свойств. Сварка ведется мягким нормальным ацетиленокислородным пламенем без перегрева сварочной ванны, но с хорошим ее перемешиванием. В качестве присадки применяются прутки того же состава или из бронзы БрОЦ 4-3 и БрОФ 6,5-0,4 и флюса того же состава, что и для сварки меди. Нагрев поверхности ведется восстановительным пламенем, в процессе сварки флюс периодически подается в жидкую ванну для лучшего удаления оксидов; для выравнивания температуры делаются перерывы. После сварки производится термическая обработка – отжиг при температуре 270...300 °С.

Сварка вручную графитовым и вольфрамовым, а также покрытым электродом выполняется с присадочными материалами различного типа. Так сварка неплавящимися электродами ведется на постоянном токе прямой полярности с присадочными прутками из бронзы БрОФ 6,5-0,15 и БрОФ 9-0,3 с дополнительной подачей флюса – борного шлака; лучшие результаты достигаются при использовании прутков марки OKAutrod 19.30* (3 % Si, 0,9 % Mn, 0,1 % Sn).

При сварке покрытыми электродами на постоянном токе обратной полярности применяются прутки из бронзы БрОФ 6,5-0,15 с покрытием на основе криолита, а также электроды марки OK 94.25* с основным покрытием.

* Продукция фирмы "ESAB", Швеция.

Механизированная сварка в среде защитных газов и под флюсом применяется для сварки облицовок из бронз БрОЦ 10-2, БрОЦС 5-5-5 и БрОЦС 8-4-3 при толщинах стенки 20–45 мм на постоянном токе обратной полярности. Автоматическая сварка бронзы БрОЦ 10-2 выполняется в аргоне с использованием присадки из бронзы БрАМц 9-2, если пара работает в морской воде; для других сред нужно использовать проволоку из бронзы БрОФ 8-0,3. Кромки собираемых деталей обрабатываются на станках с высокой точностью и плотно подгоняются в соединение "в замок". Сварка ведется с проковкой каждого шва сразу после обрыва дуги; в процессе изделие охлаждается мокрым асбестом с обдувом воздухом. После сварки – термическая обработка.

При автоматической сварке под флюсом ОСЦ-45 + 5 % борного шлака облицовок из бронзы БрОЦ 10-2 применяется проволока марки бронза БрОЦ 4-3 или БрОФ 8-0,3 диаметром не более 2 мм. Технология процесса сложная: предварительная термическая обработка заготовок при температуре 500...550 °С в течение 3 ч, сварка на малой погонной энергии с охлаждением каждого валика до 160 °С, промежуточный отжиг после заварки половины сечения стыка при температуре 500 °С в течение 4 ч, отжиг полностью сваренного изделия при температуре 650 °С в течение 5 ч.

Кремнемарганцовые бронзы используются в виде поковок, проката и отливок. При их сварке возникает трудность, обусловленная их красноломкостью в интервале температур 800...950 °С, поэтому следует выбирать параметры режима, при которых охлаждение сварного шва в этом диапазоне температур протекало бы как можно быстрее. Эти бронзы обладают высокой жидкотекучестью, поэтому их можно сваривать только в нижнем или наклонном положении.

Газовая сварка выполняется нормальным ацетиленокислородным пламенем с использованием аналогичной присадки и флюсов, применяемых при сварке меди и латуней. При сварке крупногабаритных деталей сложной конфигурации требуется предварительный подогрев до 350 °С. Сварное соединение обеспечивает прочность и пластичность на уровне 80...95 % основного металла.

Сварка вручную покрытыми электродами ведется на постоянном токе обратной полярности. Стержень изготавливается из сплава БрКМц 3-1, а по-

крытие – фтористо-кальциевого типа. Лучшие результаты достигаются при использовании электродов марки ОК 94.55*; эти электроды применяются также и для наплавки бронзой БрКМц 3-1 поверхностей стальных деталей.

Медно-никелевые сплавы применяются в виде листов, труб, полос для изготовления изделий, работающих в морской воде, органических кислотах, растворах солей и т.п.

Основной трудностью при сварке является склонность к образованию горячих трещин, что обусловлено теми же причинами, что и при сварке меди; присутствие никеля в сплаве увеличивает вероятность их образования. Этому способствуют также вредные примеси – висмут, свинец образуют межзеренные жидкие прослойки, борьба с ними ведется путем введения модификаторов РЗМ, делающих структуру мелкозернистой. Наличие плоховыводимых в шлак частиц закиси никеля ($T_{пл}$ = 2090 °С) и порообразования преодолевается сваркой в инертной защитной атмосфере и компонентами флюсов и покрытий.

Газовая сварка выполняется нормальным ацетиленокислородным пламенем с применением проволоки МНЖ 5-1 и флюсов на борной основе; прочность сварного соединения составляет лишь 80...90 % от основного металла, поэтому способ применяется редко.

Ручная дуговая сварка покрытым и вольфрамовым электродами предполагает использование в качестве стержня или присадки сплава МНЖ 5-1 или МНЖКТ 5-1-0,2-0,2. На стержень наносится покрытие фтористо-кальциевого типа, процесс ведется на постоянном токе обратной полярности, а при сварке вольфрамовым электродом – в среде аргона или азота на постоянном токе прямой полярности. Предварительный подогрев сплавов, содержащих железо, не только не нужен, но и вреден. При многослойной сварке наложение каждого последующего шва осуществляется после очистки и охлаждения предыдущего до 50 °С.

Автоматическая сварка в аргоне вольфрамовым электродом применяется прежде всего при выполнении кольцевых неповоротных стыков труб. При сварке корневого шва обязательным является использование присадки во избежание образования горячих трещин и для повышения производительности. Нижние слои многопроходного шва имеют повышенные свойства по сравнению с верхними благодаря их термической обработке, а коррозионная стойкость остается такой же, как и у основного металла.

Механизированная сварка плавящимся электродом в среде защитных газов позволяет значительно повысить производительность по сравнению с рассмотренными ранее способами. Она выполняется на постоянном токе обратной полярности в среде аргона или азота с применением сварочной проволоки марки МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 диаметром не более 1,6 мм.

Сварка под флюсом ведется на постоянном токе обратной полярности и выполняется с использованием проволок БрОЦ 4-3 или МНЖКТ 5-1-0,2-0,2 в сочетании с плавленым флюсом ОСЦ-45. Если формирование обратной стороны шва производится на графитовой подкладке, ее нужно предварительно прокалить при температуре 200...300 °С.

Никель и его сплавы* обладают высокой коррозионной стойкостью в агрессивных средах, жаропрочностью магнитострикционными свойствами, способностью сохранять пластические свойства при высоких и низких температурах и т.п. Из них изготавливаются аппараты для приготовления и транспортирования многих химических и пищевых продуктов, электрохимии, криогенной техники и т.п.

Свариваемость никеля сильно зависит от вредных примесей, содержание которых ограничивается величинами: углерод 0,15 %, сера 0,005...0,03 %, фосфор 0,005 %, висмут, мышьяк, свинец, сурьма – не более 0,005 % каждого. Кроме того, никель и его сплавы чувствительны к газам, растворимость которых в твердом металле мала, в результате чего образуются поры и "водородная болезнь". Поэтому надежная защита плавильного пространства в сочетании с введением активных раскислителей (титана, алюминия) и дегазацией сварочной ванны обеспечивает получение качественных сварных швов.

Для измельчения структуры сварка ведется на пониженной погонной энергии с подачей в сварочную ванну элементов (модификаторов) – титана, молибдена, РЗМ. Металл сварного шва обладает худшими литейными свойствами, меньшей жидкотекучестью по сравнению со сталью, а основной металл проплавляется на меньшую глубину, поэтому требует большего угла раскрытия кромок и меньшего притупления разделки. Сплавы никеля: монель-металл, нихром – имеют большую литей-

* Здесь не рассматриваются никелевые жаропрочные и жаростойкие сплавы, изготовленные в соответствии с ГОСТ 5632–72.

ную усадку, большее электрическое сопротивление, меньшую теплопроводность по сравнению с никелем; при сварке нихрома нужно бороться с оксидной пленкой Cr_2O_3, которая затрудняет формирование шва. Сплавы никеля с молибденом, никеля с молибденом и хромом требуют после сварки термической обработки при температуре 700...800 °С с последующим охлаждением на воздухе или в воде для получения мелкозернистой разориентированной структуры и снятия сварочных напряжений.

Подготовка металла под сварку включает механическую обработку и обезжиривание, а металл с оксидной пленкой после длительного высокотемпературного нагрева требует химической обработки в различных реактивах.

Газовая сварка обычно используется при сварке тонколистового металла при изготовлении малогабаритных изделий. Осуществляется нормальным или слабовосстановительным ацетиленокислородным пламенем. В качестве присадки используются никелевые прутки, содержащие до 3 % Mn, в качестве флюса – бура, а также смеси хлористых солей щелочноземельных металлов с бурой и борной кислотой.

Сварка ведется за один проход при погружении прутка в сварочную ванну без ее перемешивания, процесс ведется непрерывно, без задержек.

После сварки производится термическая обработка – нормализация при температуре 825...900 °С для повышения пластичности и вязкости сварных соединений.

Сварка графитовым электродом ведется на постоянном токе прямой полярности и переменном токе и применяется в основном для никелевых сплавов. Нихромовые нагреватели термических печей проволочные и ленточные толщиной 1,5...3,0 мм сваривают без присадки, в случае необходимости применяется присадка из проволоки НМц 2,5 в сочетании с флюсом на борной основе. Свариваемые нихромовые проволоки скручиваются на узел, ленты собираются с отбортовкой, посыпаются флюсом и подвергаются действию дуги до получения шарика на проволоке или шва на ленте.

Сварка покрытыми электродами ведется на постоянном токе обратной полярности при сварке металла толщиной более 1,5 мм. Вообще никель в качестве присадочного металла оказался очень полезным материалом для соединения металлов не только на его основе, но и для холодной и полугорячей сварки чугуна, сварки никеля со сталями, сварки разнородных плохосваривающихся сталей и сплавов, для наплавки промежуточных буферных слоев. Разработанные марки электродов (табл. 3) широко используются для этих целей.

Таблица 3

Марки покрытых электродов для сварки никеля и его сплавов, химический состав и свойства наплавленного металла

Марка электрода	Содержание элементов (Ni – остальное), % мас.								$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %
	Si	Mn	Fe	Ti	Nb	C	Cu	Al			
ОЗЛ-32	1,0	2,5	2,1	1,1	–	0,1	–	0,5	440	205	25
В-56У	–	–	0,5	–	–	–	29,0	–	390	–	–
ОК 92. 28*	1,2	0,4	2,0	–	–	1,0	–	–	400	330	25
ОК 92. 58*	0,7	0,6	43,0	–	–	0,7	–	–	–	–	–
ОК 92. 86*	–	4,5	–	0,3	2,0	0,05	20,0	–	540	350	–
ОК 92. 88*	0,6	1,0	1,5	–	–	–	32,0	–	–	–	–
Superfonte Ni**	–	–	2,0	–	–	0,5	–	–	400	200	25
Superfonte NiFe**	–	–	46,0	–	–	0,5	–	–	450	300	10
Superfonte NiCu**	–	–	4,0	–	–	0,5	30	–	440	220	15

*Продукция фирмы "ESAB", Швеция.

**Продукция фирмы "Air Liquide Group", Швейцария.

Примечание. Диаметры электродов 2,5; 3,0; 3,2; 4,0; 5,0 мм.

Таблица 4

Марки присадочных материалов для сварки вольфрамовым электродом, химический состав и свойства наплавленного металла

Марка присадки	Содержание элементов (Ni – остальное), % мас.									$\sigma_в$, МПа	$\sigma_т$, МПа	δ, %
	Si	Mn	Fe	Ti	Nb	Cr	C	Cu	Al			
НМц АТЗ-1,5-0,6	–	3,0	–	0,6	–	–	–	–	1,5	–	–	–
НМц АТК 1-1,5-2,5-0,15	0,15	1,0	–	2,5	–	–	–	–	1,5	–	–	–
OK Autrod 19. 82* OK Tigrod 19. 82*	–	–	0,5	–	Nb + Ta 1,5	22	0,01	Mo 9,0	–	800	500	38
OK Autrod 19. 85* OK Tigrod 19. 85*	–	3,0	–	–	Nb + Ta 2,5	21	0,05	–	–	700	360	44
OK Tigrod 19. 92*	–	0,4	–	3,0	–	–	0,02	0,1	0,1	500	300	27

*Продукция фирмы "ESAB", Швеция: Tigrod – прутки диаметром 1,6; 2,0; 2,4; 3,2 мм; Autrod – проволоки диаметром 0,8; 1,0; 1,2; 1,6 мм.

При сварке выполняются незначительные продольные колебания концом электрода для лучшего газоудаления и получения плотных швов. При толщине металла более 15 мм требуется предварительный подогрев до температуры 200...250 °С. Сварка выполняется за один проход, при выполнении многослойных швов требуется тщательная очистка поверхности промежуточных швов. После сварки требуется термическая обработка при температуре 825...900 °С с охлаждением на воздухе для снятия сварочных напряжений.

Дуговая сварка вольфрамовым электродом ведется на постоянном токе прямой полярности или на переменном токе в аргоне и применяется для изготовления изделий толщиной до 10 мм.

Получение качественных сварных швов обеспечивается применением присадочных материалов, приведенных в табл. 4. Сварка ведется левым способом на большой скорости с минимальными поперечными колебаниями горелки. При многослойной сварке последующие швы накладываются после полного охлаждения, зачистки и обезжиривания предыдущих швов.

Механизированная сварка и наплавка плавящимся электродом ведутся на постоянном токе обратной полярности и применяются как для сварки металла толщиной более 5 мм, так и для нанесения специальных слоев на стали и чугуне. Сварка в защитных газах осуществляется в среде аргона, а также в его смеси с 20 % водорода, что значительно улучшает качество шва, но усложняет применение этой технологии, обусловленной опасностью, связанной с использованием водорода. Присадкой является проволока марки НМц 2,5, а также другие проволоки, приведенные в табл. 4. Сварка под флюсом ведется как с использованием стандартных плавленых флюсов марок АН-348А, АН-20, АНФ-5 в сочетании с проволоками, приведенными в табл. 4, так и под специальным керамическим флюсом ЖН-1 с проволоками марок НП1 и НП2. Для предупреждения чрезмерного роста зерна сварка ведется швами небольшого сечения при их медленном охлаждении. Наплавка медноникелевого сплава типа "монель" на сталь ведется под флюсом АН-26 или в аргоне проволокой марки НМЖМц 28-2,5-1,5. Поверхностные дефекты и трещины на чугунных деталях заплавляются с использованием самозащитной цельнотянутой проволоки ПАНЧ-11, которая обеспечивает получение никелевого металла.

Электрическая контактная сварка применяется в основном по отношению к сплавам никеля – нихрома, монеля, инконеля и др., в то время как чистый никель из-за большой электропроводности сваривается хуже. Чтобы не допустить перегрева сплавов никеля при точечной сварке, выбираются меньшие токи, большие давления на электроды и повышенное охлаждение зоны сварки; последнее достигается погружением электродов и изделия в воду или охлаждением струей воды.

Стыковая сварка может осуществляться как сопротивлением, так и оплавлением, однако в связи

со склонностью к росту зерна необходимо ограничивать продолжительность пребывания металла при высокой температуре и повышенной пластической деформации. Сплавы никеля, содержащие хром и алюминий, в связи с образованием соответствующих оксидных пленок требуют предварительного подогрева, который уменьшает необходимые давления, и большие величины конечных скоростей оплавления и осадки.

Свинец отличается высокой коррозионной стойкостью в некоторых чрезвычайно агрессивных средах, применяется в электротехнике и в антифрикционных сплавах. Вследствие низкой прочности свинца самостоятельных металлоконструкций из него не изготавливают, а используют в качестве плакирующего материала, которым облицовывают стальные, бетонные и даже деревянные емкости.

Трудность при сварке свинца обусловлена его низкой температурой плавления (327 °С), высокой жидкотекучестью и наличием тугоплавкой ($T_{пл}$ = = 888 °С) оксидной пленкой PbO, которая засоряет сварочную ванну, а пары этого оксида являются чрезвычайно вредными для здоровья сварщика. Свинец при нагреве склонен к росту зерна, поэтому металл шва имеет крупнокристаллическую малопластичную структуру. Для улучшения свойств основной и присадочный металл модифицируют кальцием, оловом и селеном. Вредной примесью в свинце является сурьма, которая способствует его охрупчиванию.

Для защиты сварочной ванны от окисления применяют флюс, состоящий из смеси 50 % стеарина и 50 % канифоли, используемый при сварке листов толщиной свыше 6 мм; для меньших толщин достаточно только стеарина. Флюс наносится как на свариваемые кромки, так и на прутки, а сварку ведут в нижнем или вертикальном положении. В последнем случае используют специальные формирующие кристаллизаторы. Перед сваркой кромки и прилегающие участки подвергают механической и химической обработке.

Газовая сварка выполняется нормальным ацетиленокислородным пламенем, в качестве присадки используются круглые свинцовые прутки или "лапша", нарезанная из листов. Листы свариваются встык, а присадка заранее укладывается в разделку. Сварка ведется левым способом путем создания отдельных ванночек (капель) при одновременном нагреве основного и присадочного металла до начала расплавления, а потом горелка отводится в сторону до стекания капли присадки на расплавленный металл кромок. Шов образуется из отдельных, перекрывающих друг друга участков. Оксиды свинца всплывают на расплавленную пленку флюса и пламенем горелки удаляются с места сварки.

Сварка неплавящимися электродами ведется на постоянном токе прямой полярности с применением как графитового, так и вольфрамового электродов. В последнем случае достигается большая производительность (по сравнению с газовой сваркой выше в 5–7 раз, особенно при использовании импульсно-дугового процесса).

Наплавку свинца на стальную поверхность, предварительно облуженную, выполняют вольфрамовым электродом в аргоне.

После сварки и наплавки рекомендуется проковать наплавленные валики.

Библиографический список

1. **Абрамович В.Р., Тимофеев В.Н.** Справочник по сварке и пайке судовых трубопроводов. Л.: Судостроение, 1982. 112 с.
2. **Амигуд Д.З.** Справочник молодого газосварщика и газорезчика. Изд. 2-е исправл. и доп. М.: Высшая школа, 1977. 188 с.
3. **Гуревич С.М.** Справочник по сварке цветных металлов. К.: Наукова думка, 1981. 608 с.
4. **Литейные** бронзы. Под ред. К.П. Лебедева. Л.: Машиностроение, 1973. 312 с.
5. **Металлография** промышленных цветных металлов и сплавов / М.В. Мальцев, 2-е изд. М.: Металлургия, 1970. 364 с.
6. **Плазменная** наплавка металлов / А.К. Вайнерман, М.Л. Шоршилов, В.Д. Веселков, В.С. Новосадов. Л.: Машиностроение, 1969. 192 с.
7. **Промышленные** цветные металлы и сплавы. 3-е изд. / А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина, А.В. Белова. М.: Металлургия, 1974. 488 с.
8. **Псарас Г.Г., Ежель А.И.** Сварщику цветных металлов: справ. пособие. Донецк: Донбасс, 1982. 151 с.
9. **Ремонт** наплавкой питательных установок непрерывной варки целлюлозы (Библиотечка механика целлюлозно-бумажного производства) / С.Л. Миличенко, О.Г. Быковский. М.: Лесная промышленность, 1973. 40 с.
10. **Сахацкий Г.П.** Технология сварки металлов в холодном состоянии. Киев: Наукова думка, 1979. 296 с.
11. **Сварка** плавлением меди и сплавов на медной основе / В.Р. Абрамович, В.П. Демянцевич, Л.А. Ефимов. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1988. 215 с.
12. **Справочник** сварщика судостроителя / В.Р. Абрамович, В.П. Бочкарёв, Л.Б. Глушаков и др. Л.: Судостроение, 1981. 272 с.
13. **Биковський О.Г., Піньковський І.В.** Довідник зварника. К.: Техніка, 2002. 336 с.
14. **Технологія** та обладнання електричного контактного зварювання.: навч. посіб. / О.Г. Биковський, Д.М. Лутов, І.В. Піньковський. К.: Техніка, 2001. 240 с.

УДК 621.792; 62-50: 62-525: 628

В.С. Безменов, *д-р техн. наук*
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН),
А.В. Игнатов, *канд. техн. наук (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: avlig@yandex.ru

Принципы построения автоматизированных дозирующих устройств для нанесения клеевых композиций в процессах сборки в машиностроении

Проведены критический обзор и анализ современных технологий и методов нанесения клеевых композиций в процессах сборки в машиностроении и предложены принципы построения автоматизированных пневматических дозирующих устройств для нанесения жидких термореактивных клеевых композиций и их дозирования с контролем отмеривания дозы по времени.

The critical review and analysis of state-of-art technologies and methods for adhesive composition application during assembling are presented and the principles for construction of automatized pneumatic dosers for liquid thermosetting adhesive composition application and dosing with time dose metering control are proposed.

Ключевые слова: технологический процесс сборки, клеевые композиции, клеевое соединение, средства автоматизации.

Keywords: assemblage technological process, glue, glue junctions, automation.

При разработке технологического процесса сборки клеевых соединений большое внимание уделяется операциям нанесения клеевых композиций. Вызвано это тем, что на этапе нанесения должна обеспечиваться сплошность и толщина клеевого слоя, равномерность его нанесения по всей траектории, также должно учитываться количество смазываемых клеем поверхностей. От этих параметров клеевого шва зависит конечная прочность соединения.

Основным критерием при нанесении клеевой композиции принято считать толщину клеевого слоя. Производители клеев рекомендуют граничные размеры указанного критерия исходя из химической основы композиции. При создании конкретного соединения в соответствии с условиями эксплуатации, как правило, эмпирическим путем удается определить рациональные значения толщины клеевого шва. При этом иногда прибегают к введению нейтральных наполнителей в исходную клеевую композицию для регулирования ее вязкости.

На технологию нанесения особое влияние оказывает состояние клеевых композиций (жидкое, твердое, порошкообразное и др.). Для конкретного клеевого соединения уточняют метод нанесения. При разработке методологии нанесения необходимо учитывать габаритные размеры склеиваемых поверхностей, тип и общую оснащенность производства, производительность оборудования, состояние и свойства клея, вид получаемого соединения. При ручном нанесении используют различные валики, шпатели, кисти, тампоны, форсунки и т.д. Пленочные клеи нарезают ножницами, порошкообразные просеивают через сито. При механизации и автоматизации работ используют различные дозаторы, снабженные соплом, или распылительные системы. Находит свое применение электростатическое нанесение. Для термопластичных клеев используют термопистолеты, установки индукционного нагрева и т.п.

При выборе способа и механизма нанесения клея определяющее значение имеют его агрегатное состояние, вязкость, число компонентов и вид, а также тип соединения, характеристика производства и степень автоматизации процесса. При анализе клеевых композиции

ций их различают по вязкости как жидкие, пастообразные и твердые.

Условно все применяемые клеевые композиции можно разделить на термореактивные и термопластичные. При отверждении термореактивные клеи переходят в необратимое нерастворимое и неплавкое состояние, их невозможно применять повторно. При разборке соединение с термореактивным клеем разрушается. Термореактивные клеи выпускаются в жидком и пастообразном состояниях. В отличие от термореактивных клеев термопластичные клеи выпускаются только в твердом состоянии. Они представляют собой упругий материал различного цвета, лишенный способности прилипать к поверхности. Такой материал приобретает свойства клея с высокой вязкостью после разогрева до жидкого состояния. При остывании термопластичного клея образуется клеевой шов. При необходимости разборки соединения его нагревают, после чего клей вновь будет пригоден для применения.

Термореактивные клеевые композиции могут быть многокомпонентными. Обычно компонентов два или три, но может быть больше. Многокомпонентные термореактивные клеи имеют значительно больший срок хранения по сравнению с однокомпонентными. Если при склеивании применяют вспомогательные вещества, например растворители и разделительные агенты, то их нанесение – это вспомогательная операция перед склеиванием, требующая выбора устройств для их нанесения. Разделительными агентами защищают рабочее место и приспособление для нанесения клея от нежелательного прилипания его избытков.

Метод ручного нанесения применяется, как правило, в единичном и мелкосерийном производствах. Этот метод требует высокой квалификации рабочих для получения качественного клеевого шва. Для нанесения клеев в ручном режиме используют кисти, шпатели, ракли, стержни, ножницы, сита, простейшие приспособления.

В таблице представлены наиболее часто применяемые классы механизмов для нанесения клеевых композиций в ручном и автоматизированном режимах в машиностроении.

Наиболее часто применяемые классы механизмов для нанесения клеевых композиций в ручном и автоматическом режимах

Состояние клея	Вид клея	Характеристика соединения			
		Плоские	Цилиндрические	Сложной формы	Клеемеханические
Жидкий	Термореактивный с растворителем	ву, рау, мд, ад, к, шп	мд, ад, к	су, мд, ад, к, ст	к, ст, су, ад
	Термореактивный однокомпонентный	су, к, шп, ву	су, к, ад, мд	су, к, ад, мд	су, к, ад
	Термореактивный многокомпонентный	ву, рау, мд, ад, шп, ст	мд, ад, су	ст, шп, су, мд, ад	ст, шп, су, мд, ад
Паста	Одно- и многокомпонентный в тубах	су, к, шп, ру, мд	су, к, мд	су	су, шп
	Одно- и многокомпонентный в банках и бочках	ву, к, шп, ру	к, су	ст, шп, су, мд, ад	шп, су, мд
Твердый	Пленки и ленты	н	–	–	н
	Термопластичные порошки	с, ну	–	–	с, ну
	Термопластичные произвольной формы (прутки, гранулы и др.)	ну	ну	ну	ну

Примечание: ад – автоматический дозатор; ву – валковое устройство; к – кисть; мд – механический дозатор; н – ножницы; ну – нагревательное устройство; рау – распылительное устройство; ру – раклевое устройство; с – сито; ст – стержень; су – устройство, снабженное соплом (туба, шприц и т.п.); шп – шпатель.

Нанесение термопластичных клеев редко осуществляется вручную. Эти клеи чувствительны к перегревам, поэтому даже в единичном производстве рекомендуется применять специально разработанные нагревательные приспособления – ручные термопистолеты, снабженные клеевым стержнем. Термопистолеты выпускаются с нагревателем трех видов: ступенчатого нагрева, бесступенчатого нагрева и с обратной связью. Нагревательный элемент со ступенчатым нагревом обеспечивает требуемую температуру плавления клея на выходе его из сопла, а на входе клеевого стержня в нагреватель должна быть более низкая температура. Это делается для того, чтобы не подвергать клей повторному нагреву и расплавлять лишь ту часть, которая требуется для сборки соединения. Благодаря ступенчатому нагреву сокращается время на расплавление каждой порции клея, которая идет на сборку следующего узла. Если применение ступенчатого нагревателя экономически невыгодно, то используют конструкции с нагревателем бесступенчатого нагрева, в которых нагреватель устанавливают только на выходе клея ближе к соплу. Однако в этом случае может произойти перегрев клея. Для предотвращения перегрева клея рекомендуется применять термопистолеты, оснащенные автоматической системой обратной связи между клеем и нагревателем, чтобы в емкости с клеем регулировалась требуемая температура. Подача клеевого стержня может осуществляться вручную, т.е. подталкивают непосредственно пальцем (с холодного конца) или с помощью курка подающего устройства рычажной, храповой или шестеренчатой конструкции.

Автоматизация нанесения клеев применяется в случаях: требования высокой производительности; применения опасных для здоровья человека клеев или их компонентов; обеспечения высокого качества клеевого соединения, которое недостижимо при ручном нанесении. При автоматизированном нанесении удается достичь стабильного качества клеевого соединения, обеспечивается экономичный расход клеев, значительно улучшается внешний вид соединения. Разрабатывая автоматизированные технологические процессы сборки клеевых соединений, технологи и конструкторы устройств для нанесения клеевых композиций стремятся добиться его безотходного использования.

Механизмы автоматизированного нанесения клеев обычно выполняют следующие функции: дозирование подачи клея; смешение компонентов клея в требуемых пропорциях в случае применения многокомпонентных клеев; нанесение клея с требуемыми параметрами клеевого шва (толщина клеевого шва, равномерность нанесения, площадь нанесения и т.п.); транспортировка в зону сборки. При использовании термопластичных клеев на механизмы нанесения накладывается дополнительная функция разогрева клея и поддержания требуемой температуры на всем пути транспортировки клея.

Существующие устройства для нанесения клеев могут работать с ограниченным вмешательством и без вмешательства человека по заданной программе, обеспечивая высокое качество сборки. Для задания траектории нанесения клея используют компьютерное управление, различные кулачковые и барабанные устройства, копиры. Для нанесения клеев на большие площади применяют метод трафаретной печати, метод распыления клея и другие методы, позволяющие покрыть клеем всю площадь или отдельный участок поверхности. Метод распыления клея становится экономически выгодным в автоматизированном режиме, так как в этом случае исключается его перерасход.

В конструкцию устройства для нанесения многокомпонентных клеев входят дозирующие узлы, которые обеспечивают требуемое соотношение компонентов клея. Чем ответственнее соединение, тем точнее механизм дозировки. Для особо ответственных соединений используют дорогостоящие высокоточные насосы, снабженные системами контроля.

Известные устройства для нанесения однокомпонентных термореактивных клеев в об-

щем виде включают в себя следующие элементы: емкость с клеем, насос с приводом, дозирующее устройство, датчик уровня клея, дозирующие (распределительные) клапаны, управляющие (следящие) системы, транспортную систему, систему фильтрации, рабочий орган нанесения клея. В случае использования многокомпонентных термореактивных клеев к перечисленным элементам добавляются: система смешения компонентов; счетно-решающий механизм, отслеживающий правильность соблюдения пропорции различных компонентов; система очистки, срабатывающая при истечении срока жизнеспособности клея, т.е. по мере его затвердевания. Для конструкций устройств, используемых в производстве с высоким уровнем автоматизации, характерно наличие вспомогательных систем, например системы промывки установки после ее отключения, системы осушения (для исключения влияния влаги на композицию) и др. Такие устройства могут работать без присутствия человека. Для малоответственных соединений из описанной модели конструкции устройства для нанесения клея могут исключаться некоторые элементы, например, датчик уровня клея, следящие системы, система очистки, упрощаются остальные элементы конструкции. Надзор человека за работой такого устройства необходим.

Рабочие органы для нанесения клея обычно делают съемными. Их выбирают в зависимости от конкретных условий работы и параметров клеевого соединения.

При разработке устройств для нанесения клеевых композиций необходимо учитывать их специфические особенности. Клеевые композиции обладают в разной степени адгезивными характеристиками и способны создавать стойкие химические связи с материалами, из которых выполнены детали устройств нанесения. В зависимости от химической природы, отверждение клеевой композиции может развиваться от разных причин – при контакте с кислородом воздуха или, наоборот, при попадании в безвоздушное пространство, в результате испарения растворителя или при смешении со вторым компонентом, содержащим отвердитель и т.д. Эти особенности необходимо учитывать при выборе или проектировании устройства нанесения, чтобы не создать те условия, при которых произойдет отверждение клеевой композиции внутри устройства, парализуя ее работу. В ряде случаев в результате реакции отверждения клеевой композиции внутри устройства нанесения и дозирования его восстановление невозможно.

Транспортная система должна быть выполнена с наименьшим количеством изломов на пути следования клея. В таких изломах образуются трудноудаляемые пробки из отвержденного клея, которые могут нарушить эксплуатацию оборудования. При подаче клея сжатым воздухом исключается контакт клея с элементами конструкции механизма подачи транспортной системы, что позволяет значительно увеличить время работы устройства между чистками.

Дозирующие системы по принципу работы условно можно разделить на два вида: прерывистого действия (например, поршневые и плунжерные системы); непрерывного действия (например, шестеренчатые и нагнетательные системы). Различают три режима работы дозирующих систем, которые зависят от скорости работы исполнительных механизмов: капельный, струйный, распыления.

Наибольшее распространение в качестве дозирующих систем получили насосы, соединенные с приводом. Шестеренчатые насосы удобны для перекачивания больших объемов без пульсации или выплесков клея. Они позволяют осуществлять дозирование трех или более компонентов, но при этом чувствительны к нестабильности компонентов клея по вязкости, поэтому в их гидросистеме поддерживается постоянная температура на заданном уровне. Поршневые дозирующие системы способны транспортировать клей с высокой вязкостью. Недостатком поршневых систем является пульсация давления в гидросистеме, что приводит к гидроударам в результате возвратно-поступательного движения поршня. Такие системы ма-

лоэффективны при перекачивании одновременно более трех компонентов клея.

Задачи автоматизации операций нанесения клеевых композиций в процессах сборки в машиностроении чрезвычайно актуальны с учетом разнообразия технологических процессов сборки и физико-химических свойств самих клеевых составов. При этом основное внимание следует уделить дозирующим устройствам.

В этой связи целесообразно обратиться к разработкам сотрудников лаборатории газогидродинамических средств автоматизации Института проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН (ИПУ РАН), касающихся принципов и методов построения систем автоматизированного дозирования (САД) жидкостей [1].

Основной отличительной особенностью предложенных принципов построения САД является отказ от использования мерных камер с механическими подвижными элементами, а также насосного оборудования с механическими подвижными частями в узлах отмеривания и выдачи дозы и их замена на конструктивно более простые и надежные средства отмеривания дозы по косвенным параметрам.

В зависимости диапазона дозирования и вязкости дозируемой жидкости операция отмеривания дозы может контролироваться по следующим косвенным параметрам:

• по времени – при условии обеспечения постоянной величины расхода жидкости в линии ее подачи к потребителю;

• по достижении заданного уровня жидкости в приемной емкости в процессе ее наполнения;

• по массе дозы, отмеряемой в мерной емкости.

Реализация принципа косвенного отмеривания дозы оказалась возможной при использовании в системах дозирования пневматических датчиков барботажного типа с аналоговым или дискретным выходными сигналами. Эти датчики, чувствительным элементом которых является погруженная в жидкость барботажная трубка, позволяют контролировать перепад давлений в линии подачи жидкости в зону сборки. Применение указанных датчиков в сочетании с построением устройств управления дозированием на элементной базе промышленной пневмоавтоматики систем УСЭППА и ЦИКЛ, помимо значительного упрощения конструкции исполнительных элементов дозирующего устройства (ДУ), позволяет придать САД целый ряд дополнительных положительных качеств:

• широкий диапазон и высокая точность дозирования в сочетании с возможностью оперативной перенастройки оборудования на различную вязкость жидкостей и диапазоны дозирования;

• возможность плавной регулировки дозы в широком диапазоне ее изменения;

• возможность оперативной промывки или замены гидрокоммуникаций;

• возможность встраивания дозатора в конвейерную линию;

• возможность построения многоканальных систем дозирования;

• отсутствие межоперационного каплеобразования на торце сливного наконечника;

• высокая эксплуатационная надежность и простота обслуживания;

• пожаро- и взрывобезопасность.

Особый интерес для сборочных участков машиностроительных производств может представлять ***принцип дозирования с контролем отмеривания дозы по времени***. Этот принцип является перспективным для использования на жидких термореактивных клеевых составах (КС) и заключается в организации напорного истечения КС из замкнутого расходного резервуара с постоянным перепадом давлений на линии транспортировки КС на позицию сборки. Постоянство перепада давлений обеспечивается автоматическим регулятором управляющего устройства, а величина дозы определяется временем дозирования и проходными сечениями гидрокоммуникаций.

Принцип дозирования с контролем отмеривания дозы по времени поясняется на рис. 1.

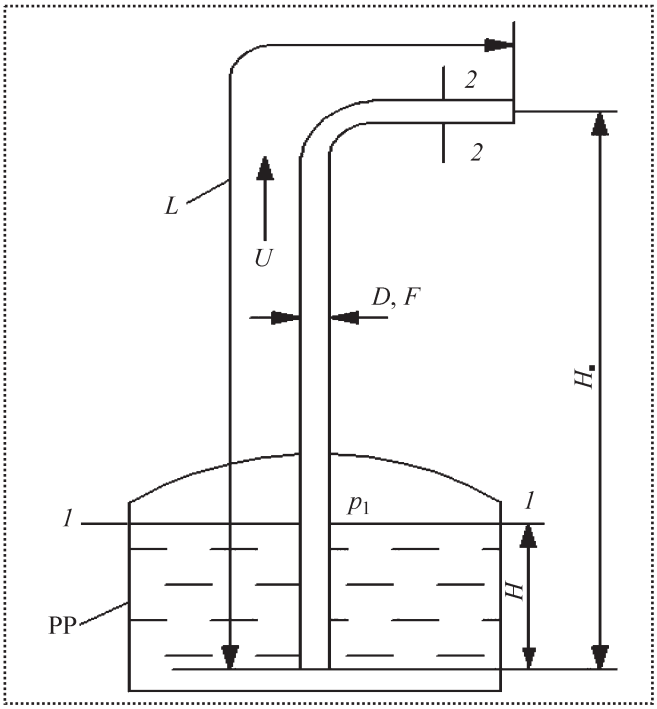

Рис. 1. Иллюстрация принципа дозирования по времени

При произвольном характере изменения избыточного давления $p_1(t)$ сжатого воздуха в замкнутом герметичном расходном резервуаре (РР) течение жидкости в выходном трубопроводе резервуара описывается дифференциальным уравнением Бернулли для неустановившегося турбулентного движения несжимаемой жидкости, которое для выделенных сечений *1-1* и *2-2* имеет вид:

$$p_1/\rho g + H = [1+\zeta+\lambda(L/D)]\times \\ \times(u^2/2g)+H_* +(L/g)(du/dt), \qquad (1)$$

где ρ – плотность жидкости; g – ускорение силы тяжести; H – уровень жидкости в РР; ζ = const – коэффициент местного сопротивления на входе в трубопровод; λ – коэффициент трения, зависящий от текущего значения числа Рейнольдса $\mathrm{Re} = \rho Du/\mu$ и от динамической вязкости жидкости μ и рассчитываемый для турбулентного течения по формуле Блазиуса: $\lambda = 0{,}316\ (\rho Du/\mu)^{1/4}$; L и D – длина и внутренний диаметр трубопровода; u – средняя по сечению трубопровода скорость течения; H_* – высота истечения.

Анализ уравнения (1) показывает, что если в процессе истечения жидкости поддерживать постоянным полное давление $\Pi = p_1 + \rho gH$ на входе в трубопровод, то при постоянных величинах плотности и вязкости жидкости, а также высоты истечения H_*, рассматриваемое течение будет установившимся. При этом скорость течения жидкости в трубопроводе u = const, и соответствующее установившееся значение объемного расхода жидкости $Q = uF$ (где $F = \pi D^2/4$ – площадь сечения трубопровода) рассчитывается по формуле

$$Q = kF[(2/\rho)(\Pi - \rho gH_*)]^{1/2}, \qquad (2)$$

где $k = 1/[1 + \zeta + \lambda(L/D)]^{1/2}$ – коэффициент расхода.

Таким образом, поддерживая с помощью автоматического регулятора постоянное (не зависящее от текущей величины H уровня жидкости в РР) значение полного давления Π на входе в трубопровод, можно реализовывать процессы непрерывного дозирования с регулируемой (в зависимости от величины Π) производительностью, т.е. при Π = const рассмотренную схему транспортировки жидкости под давлением сжатого воздуха можно рассматривать как ДУ непрерывного действия. При этом описываемая уравнением (2) функциональная зависимость расхода Q от давления Π, представляющая собой тарировочную характеристику ДУ, может быть легко получена экспериментальным путем.

Для реализации на основе рассмотренного ДУ непрерывного действия операций порционного дозирования достаточно дополнить его схему отсечным клапаном, служащим для прерывания потока. Поскольку при открытом положении клапана объемный расход Q является постоянным, то отмеривание заданной величины дозы может осуществляться по времени.

Блочная схема САД с контролем отмеривания дозы по времени, предназначенная для подачи требуемой дозы КС на позицию сборки,

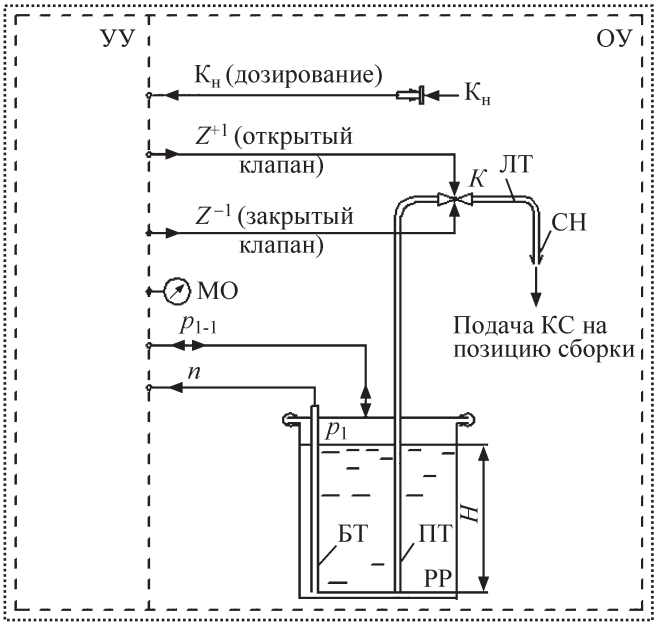

Рис. 2. Блочная схема САД с контролем отмеривания дозы по времени

показана на рис. 2. Система автоматизированного дозирования содержит объект управления (ОУ) и пневматическое управляющее устройство (УУ). В состав САД входит также образцовый манометр (МО), служащий для контроля настроечных параметров системы.

Объект управления содержит: РР с приготовленным КС; линию транспортировки (ЛТ) КС, содержащую двухпозиционный пневмоклапан (К) и сливной наконечник (СН); сенсорную пусковую пневмокнопку (Кн), служащую для подачи команды на включение УУ.

Расходный резервуар работает под давлением и снабжен герметичной крышкой с вмонтированными в нее штуцером для подвода и стравливания воздуха, питающей трубкой (ПТ) и барботажной трубкой (БТ), которая выполняет функцию датчика полного давления $П = p_1 + \gamma H$ на входе в ПТ.

Система автоматизированного дозирования работает в полуавтоматическом режиме и обеспечивает выполнение следующих функций:

• включение системы и ее подготовку к работе (заполнение ЛТ и удаление пузырьков воздуха из гидрокоммуникаций);

• автоматическое поддержание заданной постоянной величины давления $П$ на входе в ПТ в процессе разлива жидкости;

• плавную подстройку и контроль по МО настроечных параметров САД – заданного значения объема дозы (давления задания дозы $p_з$), а также заданного $П_з$ и фактического $П$ значений давления на входе в ПТ; подачу заданной дозы КС через клапан K по команде оператора от кнопки Кн; опорожнение ЛТ, оперативную промывку и (или) замену гидрокоммуникаций ЛТ.

Управляющее устройство состоит из следующих функциональных узлов: пульта управления (ПУ), командного узла (КУ) с пневматическим таймером для отсчета времени дозирования, узла контроля настроечных параметров (УК) и регулятора давления (РД) (на схеме не показаны).

Пульт управления содержит пневмотумблеры для контроля заданного и фактического значений параметра $П$, а также для подачи сжатого воздуха в РР и заполнения ЛТ дозируемым составом при подготовке САД к работе.

Командный узел вырабатывает командные сигналы $Z^{+1} = 1$, $Z^{-1} = 0$ на включение клапана K и отсчет времени дозирования и сигналы $Z^{+1} = 0$, $Z^{1} = 1$ по окончании времени дозирования.

Узел УК служит для коммутации на МО настроечных параметров САД (давлений $П_з$ или $П$ по выбору), а также давления задания дозы $p_з$.

Регулятор давления РД обеспечивает автоматическое поддержание заданной постоянной величины $П_з$ давления $П$, обеспечивая постоянство величины расхода жидкости в линии налива при открытом положении клапана K и создавая тем самым возможность отмеривания дозы по времени.

Использование ***системы многокомпонентного дозирования*** представляет интерес при дозировании многокомпонентных термореактивных КС. Блочная схема системы многокомпонентного дозирования с использова-

нием емкости смесителя (ЕС), обеспечивающая одновременное смешение в заданном соотношении компонентов КС и дозирование полученной смеси – непрерывное или порционное (при наличии в УУ дополнительного таймера отсчета времени дозирования) показана на рис. 3.

Объект управления содержит: расходные резервуары $РР_1$, ..., $РР_n$ по числу n компонентов с барботажными трубками – датчиками полных давлений $П_1$–$П_n$ на входах в питающие трубопроводы; ЕС с барботажным датчиком уровня; пневмоклапаны дозирования компонентов K_1–K_n и пневмоклапан $K_{сл}$ на линии слива (ЛС); постоянные дроссели $Д_1$–$Д_n$, установленные в питающих трубопроводах и служащие для грубой настройки расходов компонентов и их соотношения.

Управляющее устройство содержит пульт управления (ПУ), блок регуляторов (БР) расходов компонентов, блок контроля параметров (БКП), блок дозирования (БД), блок продувки и слива (БПС) и блок контроля герметичности РР (БКГ).

Система автоматизированного дозирования обеспечивает: смешение компонентов КС и одновременное непрерывное (или порционное) дозирование смеси в зону сборки; ручное управление клапанами K_1–K_n и клапаном $K_{сл}$ на ЛС от пневмотумблеров с ПУ; опорожнение ЛС и ее продувку; контроль герметичности и уровней заполнения РР; контроль гидравлического сопротивления ЛС при подготовке САД к работе; автоматическое отключение подачи сжатого воздуха в РР в случае аварийного повышения давлений в последних; автоматическое отключение подачи дозируемых компонентов в ЕС при превышении в последней установленного значения уровня.

Пульт управления содержит тумблеры α_1–α_n для включения и выключения подачи давлений в РР; ручные задатчики расходов компонентов (заданных значений $П_{з1}$–$П_{зn}$ параметров $П_1$–$П_n$); тумблер $\alpha_{п-з}$ для выбора контролируемого сигнала – "Параметр" (давления $П_1$–$П_n$) или "Задание" (давления $П_{з1}$–$П_{зn}$); тумблеры $\alpha_{к1}$–$\alpha_{кn}$ для вызова на образцовый манометр (МО), подключаемый к блоку БКП, одного из сигналов "Параметр" или "Задание"; тумблеры β_1–β_n и $\alpha_{сл}$ ручного управле-

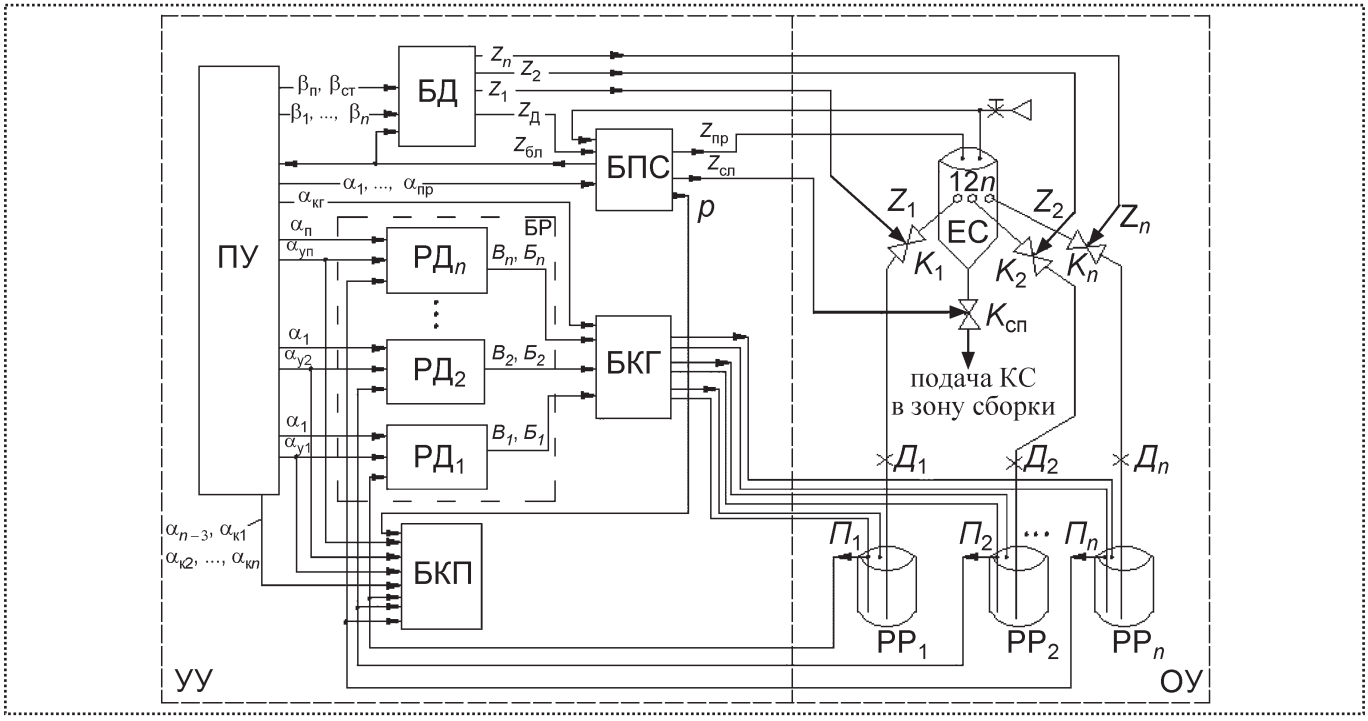

Рис. 3. Блочная схема системы многокомпонентного дозирования

ния клапанами K_1–K_n и $K_{сл}$; кнопки $\beta_{пуск}$ для подачи сигнала "Дозирование" и $\beta_{ст}$ для подачи команды на прекращение дозирования; тумблер $\alpha_{пр}$ для продувки ЛС по окончании работы; тумблер $\alpha_{к.г}$ контроля герметичности РР; индикаторы работы регулятора уровня в ЕС и ее переполнения.

Блок регуляторов расходов компонентов (БР) содержит пропорциональные регуляторы $РД_1$–$РД_n$ давлений $П_1$–$П_n$. Регуляторы вырабатывают сигналы $В_1$–$В_n$ подачи давлений сжатого воздуха в РР и сигналы $Б_1$–$Б_n$ питания барботажных датчиков давлений.

Блок контроля параметров (БКП) предназначен для контроля по МО по вызову оператора любого параметра или задания, а также уровня жидкости в ЕС – при выключенных положениях тумблеров $\alpha_{к1}$–$\alpha_{кn}$.

Блок дозирования (БД) формирует сигналы управления Z_1–Z_n клапанами K_1–K_n и командный сигнал $Z_д$ включения операции "Дозирование".

Блок продувки и слива (БПС) реализует следующие функции:

• управление транспортировкой смеси компонентов КС на позицию сборки с автоматической стабилизацией уровня жидкости в ЕС, осуществляемой посредством двухпозиционного регулятора; регулятор включается в работу сигналом $Z_д$ и формирует сигнал управления $Z_{сл}$ клапаном $K_{сл}$ на ЛС;

• коммутацию газового пространства ЕС с источником питания при продувке ЛС ($Z_{пр}$ = 1 при $\alpha_{пр}$ = 1) или с атмосферой – в отсутствие командного сигнала на продувку ($Z_{пр}$ = 0 при $\alpha_{пр}$ = 0);

• формирование сигнала $Z_{бл}$ = 1 автоматической блокировки операции "Дозирование" в случае переполнения ЕС.

Блок контроля герметичности (БКГ) предназначен для оперативного контроля герметичности РР и их герметизации при перерывах в работе системы. При выключенном положении тумблера $\alpha_{к.г}$ РР герметизируются. При этом по скорости падения давления в резервуаре, фиксируемой по МО при подключении сигнала соответствующего параметра, может быть оценена степень его герметичности.

Данная система может рассматриваться как типовая универсальная САД многокомпонентного дозирования с широким диапазоном изменения соотношения расходов компонентов КС и высокой точностью дозирования (±1 % от заданной величины дозы); при этом система характеризуется высокой эксплуатационной надежностью, компактностью УУ, пожаро- и взрывобезопасностью.

Многоканальные системы дозирования предназначены для подачи нескольких одинаковых по объему доз КС на близко расположенные друг к другу позиции сборки. Разработаны и предлагаются два принципа построения многоканальных САД – с резервуаром постоянного уровня (РПУ) и с резервуаром постоянного давления (РПД).

Принцип построения *многоканальной САД с РПУ* поясняется на рис. 4. РПУ служит для

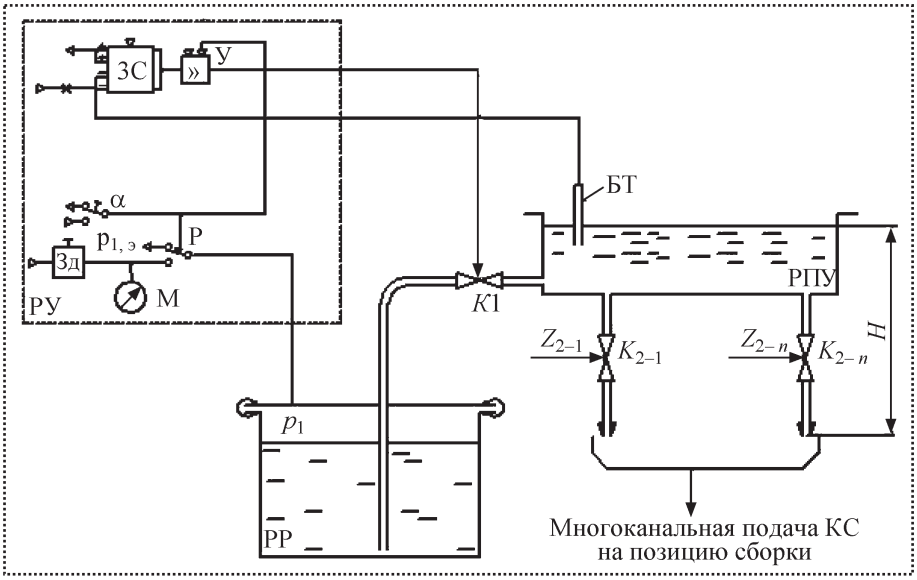

Рис. 4. Принцип построения многоканальной САД с РПУ

стабилизации гидростатического напора КС (ρgH) в линиях его подачи на позиции сборки. Каждая из n линий содержит пневмоклапан (K_{2-1}–K_{2-n}). Открытие и закрытие клапанов производится одновременно по командным сигналам $Z_{2-1} - Z_{2-n} = 1$, формируемым командным устройством (КУ) в составе УУ.

Командное устройство может обеспечивать также и выполнение следующих функций: синхронизацию работы ДУ с перемещением транспортера конвейерной линии (при сборке деталей на конвейере); автоматический контроль наличия деталей на позициях сборки, реализуемый посредством пневматических датчиков, и отключение подачи КС в случае отсутствия детали на соответствующей позиции.

Время, в течение которого клапаны K_{2-1}–K_{2-n} находятся в открытом положении, определяет объем дозы и настраивается входящим в состав УУ временным устройством. Выравнивание объемов доз по каждому из каналов производится за счет регулировки гидравлических сопротивлений линий подачи КС. Стабилизация уровня жидкости в РПУ производится посредством двухпозиционного регулятора уровня (РУ), чувствительным элементом которого является установленная в РПУ БТ. Функции регулятора выполняют элемент сравнения ЭС и релейный двухкаскадный усилитель давления У. Минусовые камеры ЭС соединены с БТ и линией ее питания (выходом постоянного дросселя д). Дискретный выходной сигнал Z_1 усилителя У подается на пневмоклапан K_1, служащий для автоматического пополнения РПУ из РР. Подача сжатого воздуха в РР производится через реле-коммутатор (Р) при включении тумблера α (при этом также включается в работу РУ).

Избыточное давление p_1 в РР задается и поддерживается на заданном постоянном уровне $p_1 = p_{1,\,з}$ задатчиком Зд и контролируется по манометру М. Ввиду достаточно малой величины гидростатического напора в линиях подачи КС (на практике высота H^* ограничена), схема многоканального дозирования с РПУ может использоваться на КС малой вязкости.

Принцип построения ***многоканальной САД с РПД*** поясняется рис. 5.

Резервуар постоянного давления обеспечивает многоканальность ДУ и служит для стабилизации перепада давлений $\Delta p = p_2 + \rho gH$ в ЛС.

Стабилизация перепада давлений Δp производится посредством двухпозиционного регулятора давления (РД). Функции собственно регулятора давления выполняют элемент сравнения ЭС2 и релейный двухкаскадный усилитель давления У2. Введенные в состав РД элемент сравнения ЭС1с усилителем У1 и постоянным дросселем в линии питания, установленной в РПД БТ, выполняют функцию индикации наполнения РПД дозируемой жидкостью до заданного постоянного уровня H^* при подготовке ДУ к работе.

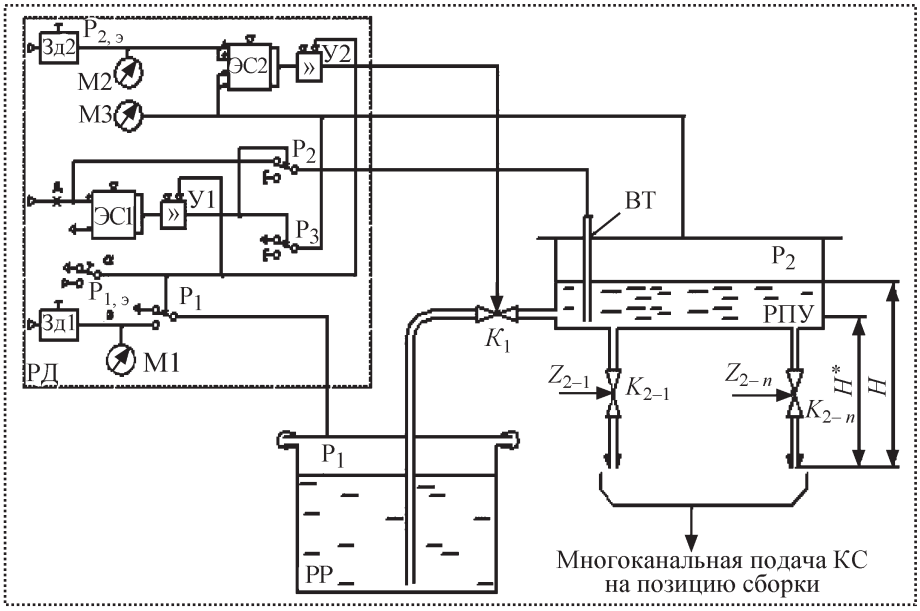

Рис. 5. Принцип построения многоканальной САД с РПД

В состав РД входят также: реле-коммутаторы Р1–Р3; задатчики давлений: Зд1 – в РР и Зд2 – в РПД; контрольные манометры М1–М3.

Подготовка ДУ к работе производится посредством включения тумблера α. При этом от задатчика давления 3д1 через реле Р1 подается сжатый воздух в РР и открывается пневмоклапан K_1, вызывая подачу жидкости в РПД.

При достижении уровнем жидкости в РПД торцевой кромки БТ повышается давление на выходе элемента сравнения ЭС1, усилитель У1 переключается в состояние "1", прекращается подача сжатого воздуха в БТ (она через реле Р2 коммутируется с заглушкой), и газовая полость РПД герметизируется (канал измерения избыточного давления p_2 в РПД через реле Р3 также подключается к заглушке).

Так как в момент срабатывания усилителя У1 клапан K_1 остается в открытом положении, процесс наполнения РПД продолжается, вызывая повышение давления p_2. При достижении давлением p_2 заданного значения $p_{2,з}$, устанавливаемого задатчиком Зд2, клапан K_1 закрывается. При этом ДУ подготовлено к работе.

При истечении жидкости по ЛС давление p_2 и, соответственно, перепад давлений Δp поддерживаются регулятором на заданном постоянном уровне посредством подпитки РПД дозируемой жидкостью через клапан K_1.

При достаточных величинах перепада давлений Δp САД с РПД может применяться для дозирования термореактивных КС повышенной вязкости.

Библиографический список

1. **Безменов В.С., Ефремов В.А., Руднев В.В.** Автоматизация процессов дозирования жидкостей в условиях малых производств. М.: ЛЕНАНД, 2010. 216 с.

2. **Игнатов А.В.** Применение клеев при сборке изделий в машиностроении: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 43 с.

СПРАВОЧНИК СЛЕСАРЯ-МОНТАЖНИКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ.

Серия справочников для рабочих

В.И. Голованов, П.П. Алексеенко, В.А. Калугин и др.

2010 г. 640 с. ISBN 978-5-94275-528-7 **Цена 1300 р.**

Изложены основы строительно-монтажного производства, система обеспечения безопасности при выполнении монтажных работ. Даны основы и практические рекомендации по эффективной деятельности монтажных предприятий и организаций в современных рыночных отношениях. Главное внимание обращено на вопросы технологической подготовки производства, методы осуществления основных монтажных работ, приемы выполнения слесарных, сборочных и вспомогательных работ и обеспечение их безопасного производства. Приведены сведения о составе и технологической структуре процессов и операций, выполняемых при монтаже оборудования промышленных предприятий. Представлены характеристики точности, технические характеристики инструмента, машин и приспособлений, используемых монтажниками. Рассмотрены вопросы испытания и ввода оборудования в эксплуатацию, а также организации оплаты труда в монтажных организациях.

По сравнению со вторым изданием содержание справочника значительно видоизменено, а объем увеличен. Введены новые главы: “Основы строительно-монтажного производства”, “Обеспечение безопасности при производстве строительно-монтажных работ”, “Нормирование и оплата труда монтажников”. Приведены новые виды инструментов и приспособлений и их характеристики. Дополнены отдельные главы и внесены изменения в технологию и процессы монтажа оборудования. Обновлена система стандартов и внесены соответствующие изменения в справочник.

Справочник предназначен для слесарей-монтажников промышленного и технологического оборудования, рабочих смежных специальностей, учащихся специальных учебных заведений, техникумов и колледжей.

107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; факс: (499) 269-48-97; e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98
и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.09.07, 621.757

В.С. Лазарчук, *аспирант,* **В.Г. Осетров,** *д-р техн. наук, профессор*
(Ижевский государственный технический университет)
E-mail: omega-hac@mail.ru

Способы реализации виртуальной сборки машин

Описаны схемы сборки, учитывающие технологические и организационные связи при подготовке производства, а также виртуальной сборки машин и способы ее достижения и совмещения с электронными схемами сборки.

This article includes are short description of the assembly schemes that take into account technological and organizational communication in preparation of production and containing short description of the virtual assembly of machines, methods of achieving it, and method of connection with the electronic circuit assembly.

Ключевые слова: виртуальная сборка, технологическая схема сборки, электронная схема сборки, нормирование переходов и операций, способы визуализации процессов сборки на основе анимации.

Keywords: virtual assembly, technological assembly scheme, electronic scheme assembly, valuation transfer and operations, methods visualization assembly process on the basis of animation.

Визуализация процесса сборки (ВПС) изделия впервые была предложена в работе [3], в которой использована виртуальная сборка изделия, полученная от конструктора, со схемой сборки технолога. Такое решение явилось началом проектирования систем автоматизированного проектирования технологического процесса (САПР ТП) виртуальной сборки машин, включающей в себя размерные, временные и организационные связи при подготовке технологических процессов. В основу САПР ТП включены следующие подсистемы: составление схем сборки, анимация соединения деталей в сборочную единицу, база данных ранее разработанных анимаций, нормирование времени рабочих ходов, технологических переходов и операций. Значительную часть САПР ТП составляют схемы сборки. Существует несколько вариантов построения технологических схем сборки.

Первый вариант, представленный в работах [1, 2], предусматривает выявление базовой детали и присоединение к ней других деталей в определенной последовательности.

Второй вариант предусматривает построение схемы сборки по Лоттеру [6], из которой выявляют независимые сборочные единицы и вид движения деталей.

Третий вариант схемы предполагает разбивку изделия на детали, комплекты, подузлы и узлы разных порядков, а затем построение схемы сборки. Такая схема сборки впервые была отражена в трудах проф. Б.Ф. Федорова и нашла широкое применение в тяжелом машиностроении [7].

Четвертый вариант схем сборки представлен в работе [5]. В этом варианте построение схемы сборки начинается с расчленения изделия на детали, после чего изображается схема в форме иерархической структуры. Каждое рабочее место $P(i)$ включает конкретную технологическую оснастку и оборудование.

Дальнейшим развитием способа построения схем сборки является система, предложенная проф. В.Г. Осетровым [4], в которой процесс сборки представлен в виде математических формул, а также в форме графа сети Петри и рабочей организационно-технологической схемы сборки. Предложенная схема является основой САПР ТП виртуальной сборки, в которой она является частью комплекса автоматизации.

Продуктом САПР ТП виртуальной сборки является так называемая *электронная схема сборки* (ЭСМ), в которую входят следующие

компоненты: схема сборки деталей, визуализация процесса сборки (ВПС), нормирование. Наличие атрибутов в фишке позволяет использовать базу данных для накопления информации по деталям, операциям с ними и готовым технологическим сборочным единицам (ТСЕ), производить быструю сортировку, поиск нужных деталей, а главное – оперативное заполнение атрибутов по готовым шаблонам. Значительным преимуществом данной схемы является также то, что появляется возможность подробного автоматизированного нормирования технологических процессов с учетом всех рабочих ходов и переходов, входящих в операцию.

В единичном производстве такие схемы сборки заменяют подробный технологический процесс. Последовательность выполнения операций отображается связями в виде ребер графа, а также цифрами, обозначающими очередность срабатывания перехода или операции. В схеме сборки учитывается увеличение массы от числа деталей и сборочных единиц, что позволяет определить момент назначения грузоподъемных устройств.

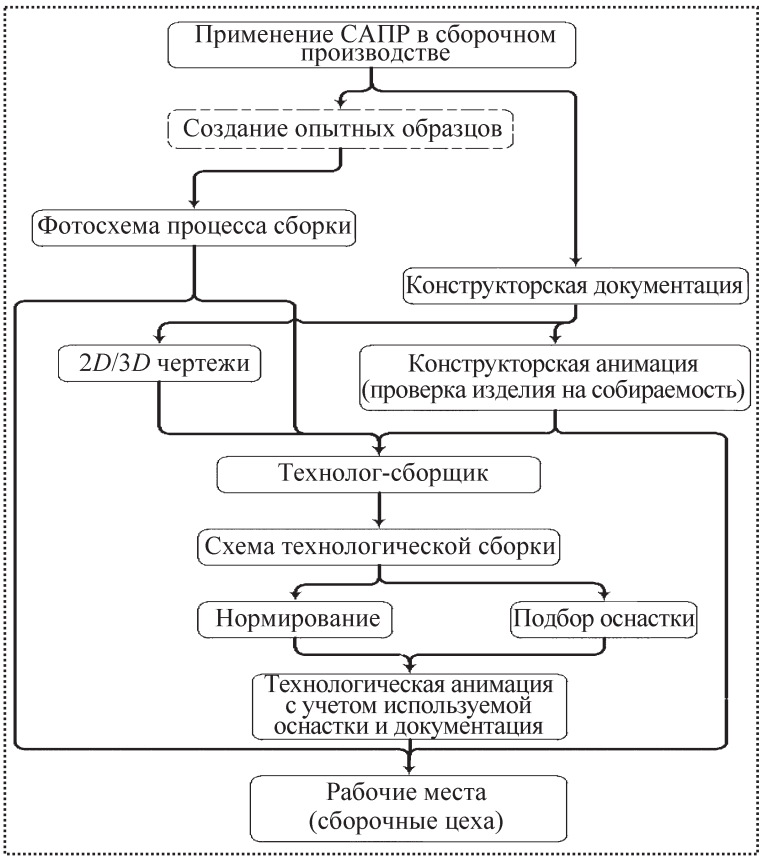

Рис. 1. Взаимодействие ВПС с электронными схемами сборки

Очень важно отметить, что в электронных схемах сборки заложено графическое представление или ВПС, которые демонстрируются на рабочем месте. Визуализация процесса сборки – это виртуальная сборка, показывающая оптимальную последовательность действий по образованию сборочных единиц из деталей с использованной технологической специальной оснастки (рис. 1).

На данный момент есть три способа представления ВПС.

Первый способ применяется в случае, если конструктор при проектировании изделия использует средства САПР проверки изделия на собираемость. В таком случае ВПС формируется посредством разбивки конструкторской анимации на переходы и операции, которые в свою очередь нормируются технологом и готовые анимации переходов с нормированием включаются в состав электронной схемы сборки в САПР ТП виртуальной сборки машин.

Основные преимущества такого способа заключаются в том, что создавать как таковой анимационный фильм по сборке, технологу не придется. Его основной задачей будет являться разбивка уже готовой анимации на части (переходы) и подбор применяемой технологической оснастки при сборке.

Недостатком такого способа является то, что в уже готовую конструкторскую анимацию, которая выполняется в трех измерениях, проблематично добавить визуально используемую технологическую оснастку и приходится ограничиваться ссылками и рисунками используемой оснастки, а каким образом она будет использована, рабочему-сборщику придется обдумывать самостоятельно.

Суть *второго способа* заключается в следующем: при создании опытных образцов произ-

водится фотовидеосъемка собираемого изделия и используемой при этом оснастки. В таком случае ВПС формируется посредством видеозаписей процесса сборки изделий, которые в свою очередь, как и в первом способе, разбиваются на переходы, операции, производится нормирование и эти видеозаписи включаются в электронные схемы сборки САПР ТП виртуальной сборки машин.

Основными преимуществами такого подхода являются: параллельность процессов создания опытных образцов и ВПС, реальная демонстрация последовательного процесса сборки и используемой при этом технологической оснастки, возможность нормирования по факту (длительность сборки по длительности фрагмента видеозаписи), отсутствие надобности в использовании САПР сторонних разработчиков.

К недостаткам можно отнести следующее: используемая оснастка при сборке не всегда соответствует той, которую должен будет использовать рабочий-сборщик, угол обзора при демонстрации ВПС равен углу обзора видеокамеры, видеофайлы имеют большой размер. Пример использования этого способа изображен на рис. 2 и 3.

Третий способ – более прогрессивный и требует особого подхода. Основан он на том, что технолог-сборщик собственноручно создает сборочную анимацию на основе чертежей, полученных от конструкторов. Такой реализации удалось достигнуть путем дополнительного составления чертежей используемой оснастки, совмещения их с чертежами сборочной единицей и пошаговой раскадровкой процесса сборки.

Достоинство такого способа состоит в независимости от конструкторских анимаций, наглядной демонстрации используемой технологической оснастки, подгонке ВПС под требования рабочих-сборщиков. Главным недостатком являются высокие требования к квалификации технолога, от которого потребуется умение соз-

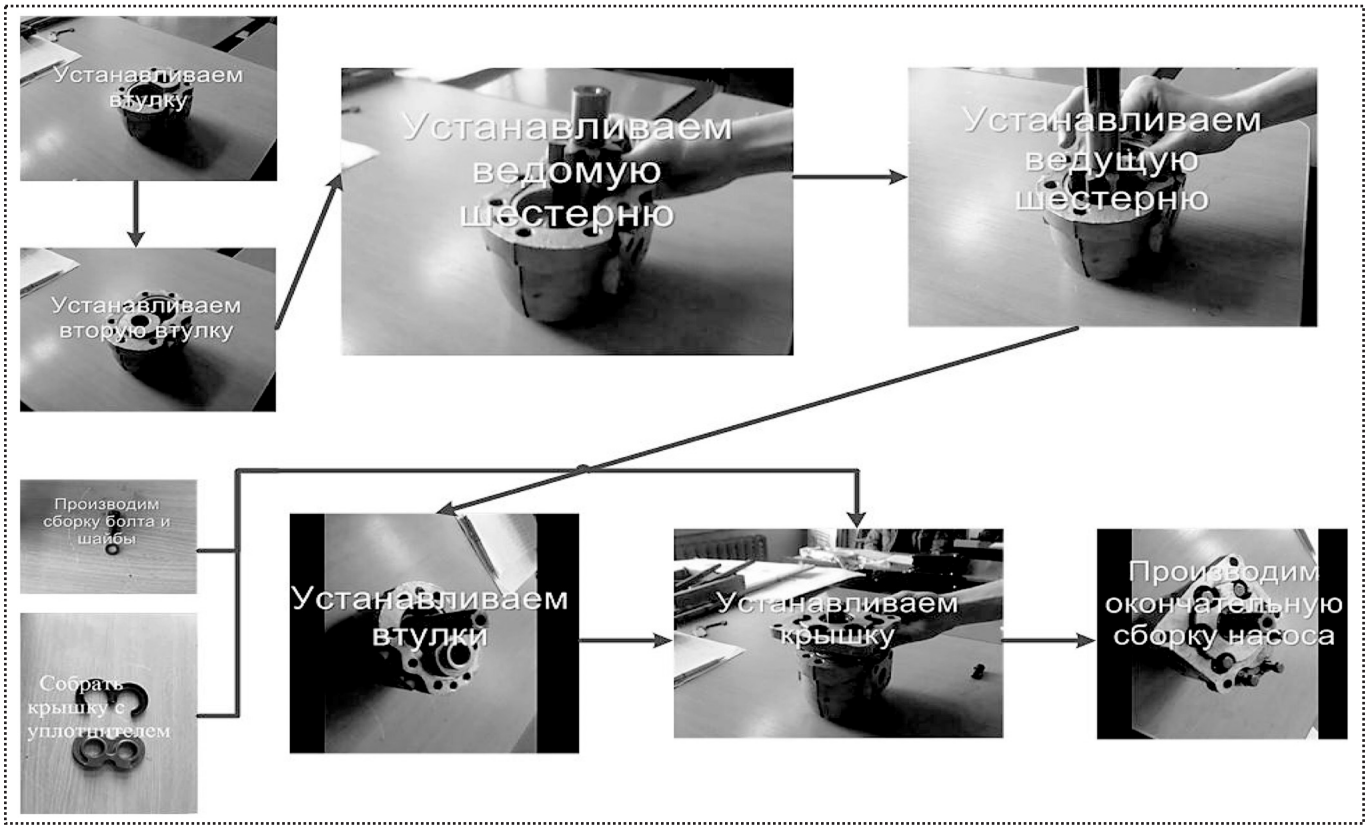

Рис. 2. Пошаговая фотосъемка сборки изделия

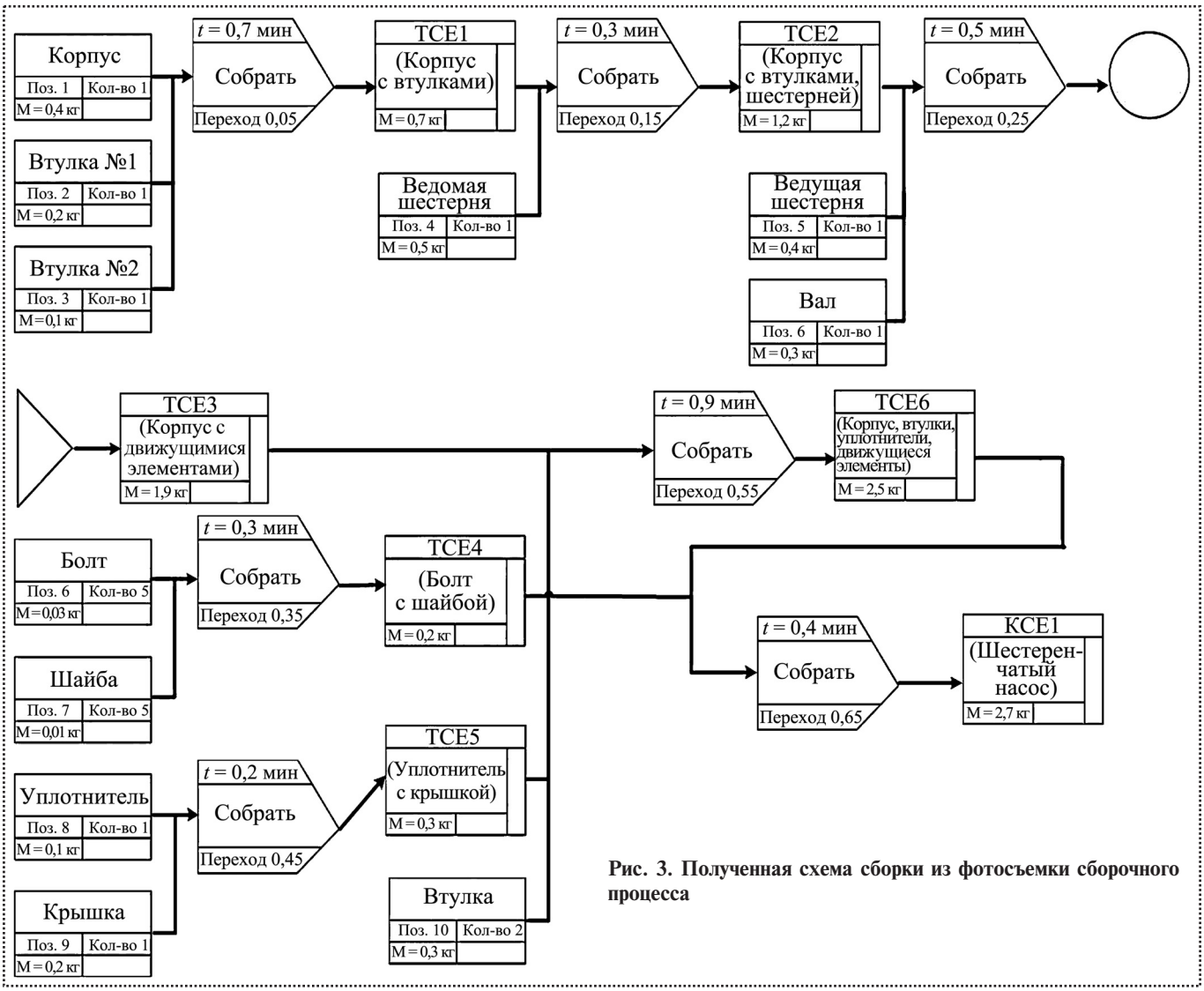

Рис. 3. Полученная схема сборки из фотосъемки сборочного процесса

давать анимации и использовать программное обеспечение сторонних изготовителей.

Говоря об экономической составляющей, следует отметить, что анализ всех трех способов приводит к выводу, что второй способ будет наиболее эффективен для отечественного производства на момент написания статьи, поскольку не требует серьезных затрат, имеет минимальную потребность в обучении (обучение использованию в работе видеоаппаратуры и САПР ТП ВС) и высокую скорость создания ВПС (равная скорости записи видеоаппаратуры). При применении данного способа отсутствует необходимость в стороннем программном обеспечении (видеофайлы прикрепляются к базе данных в САПР ТП ВС), его применение также ведет к ускорению проектирования изделий. Этого нельзя сказать о первом и третьем способах. Они требуют высокой квалификации работников и наличие соответствующего программного обеспечения, что не всегда выгодно для отечественных предприятий.

Таким образом, в зависимости от возможностей предприятия ВПС на отечественном производстве будет создаваться первым и вторым способами, с дальнейшим развитием третьего способа.

Выводы:

1) каждый из приведенных способов имеет свои плюсы и минусы, но стоит уделить боль-

шее внимание третьему способу, который на данный момент слабо развит, но имеет перспективы на широкое применение после создания базы данных чертежей технологической оснастки, определения стандартов ВПС. Третий способ должен стать решающим и основным в составлении ВПС в будущем, поскольку позволяет оставаться технологу-сборщику независимым от конструкторских анимаций и наглядно демонстрировать используемую при сборке оснастку;

2) одновременно при ВПС осуществляется нормирование времени на технологическую операцию. В отличие от виртуальной сборки, представленной конструктором, ВПС связывает конструкторско-технологическую подготовку непосредственно с производством, рабочими местами. Применение САПР ТП в области единичного и мелкосерийного производства предъявляет высокие требования к квалификации технолога. Технолог должен свободно владеть приемами составления анимации объектов на основе полученных от конструктора 2D/3D чертежей и включать программы для нормирования. Созданные анимации вместе со схемой сборки, чертежами, нормами времени передаются по сети на рабочее место рабочего-сборщика. Наличие персонального компьютера (ПК), подключенного в сеть с ПК технолога и установленного соответствующего программного обеспечения на рабочем месте рабочего-сборщика или какого-либо другого устройства для демонстрации ВПС, требует высокой культуры производства.

Библиографический список

1. **Балакшин Б.С.** Теория и практика технологии машиностроения. В 2 кн. М.: Машиностроение, 1982.

2. **Новиков М.П.** Основы технологии сборки машин и механизмов. М.: Машиностроение, 1983. 592 с.

3. **Осетров В.Г.** Прогрессивные направления в сборочном производстве и машиностроении: учебн. пособие. Ижевск: изд-во ИжГТУ, 2008.

4. **Осетров В.Г., Свитковский Ф.Ю.** Логика и практика сборки машин. Ижевск: изд-во ИжГТУ, 1996. 85 с.

5. **Павлов В.В.** Структурное моделирование производственных систем: учебн. пособие. М.: Мосстанкин, 1987. 80 с.

6. **Технология** сборочного производства в машиностроении: учебн. пособие / И.В. Абрамов, В.Г. Осетров, И.К. Пичугин, Ю.Б. Ярхов; под. общ. ред. И.В. Абрамова, В.Г. Осетрова. Ижевск: изд-во ИжГТУ, 2002. 460 с.

7. **Фёдоров Б.Ф.** Механизация и автоматизация слесарно-сборочных работ. М.: Машгиз, 1962.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".
Адрес электронной почты издательства: **E-mail: mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.
Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 13.09.11 г. Подписано в печать 20.10.11 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,04. Заказ 768. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.