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

6 2012 (143)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Кашуба Л.А. Геометрия изделий машиностроения 3

Технологическая оснастка для сборки

Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Ручной одношпиндельный гайковёрт ударного действия повышенной точности с системой контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений 13

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Карабанов В.В., Бохоров И.О. Влияние внешних воздействий на процесс пайки 16

Журавлев А.Н., Утянкин А.В. Исследование влияния технологических параметров сборочно-сварочных операций на точность буровых алмазных долот. . 29

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Безъязычный В.Ф., Федулов В.М. К вопросу технологического обеспечения качества соединений деталей при сборке с гарантированным натягом 33

Печагин А.П., Болдырев А.И., Климова Г.Н. Стабилизация геометрии литых чугунных и стальных сборных конструкций путем воздействия электромагнитными импульсами 41

В помощь конструктору, технологу

Матросова Ю.Н., Федотов М.В. Моделирование устройства для автоматизированной сборки изделий 46

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
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”, 2012**

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

6 2012 (143)

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Kashuba L.A. Geometry of products of mechanical engineering 3

Technological equipment for assembly

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu. Manual single-spindle screwdriver the shock actions of the raised accuracy with the monitoring system of axial forces of an inhaling of carving connections 13

Assembly welding works. Solder

Karabanov V.V., Bohorov I.O. Influence of external influences on soldering process 16

Zhuravlev A.N., Utyankin A.V. Research of assembly and welding procedure process parameters impact on diamond drilling bit accuracy 29

Quality assurance. Testing. Monitoring

Bezjazychnij V.F., Fedulov V.M. To the question of technological assuarence of quality of parts connections at assemblage with the guaranteed interference 33

Pechagin A.P., Boldyrev A.I., Klimova G.N. Stabilization of moulded cast iron and welded steel assembly parts geometry by electromagnetic action 41

Industrial and design engineer's aid

Matrosova Yu.N., Fedotov M.V. Simulation device for automated assembling products 46

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
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", 2012

УДК 514.851

Л.А. Кашуба, *канд. техн. наук, доцент (МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: leonid-ak@mail.ru

Геометрия изделий машиностроения

Определены требования к точности представления геометрии недеформируемых изделий машиностроения на всех этапах проектирования и производства, а также состав необходимых и достаточных терминов для представления геометрии изделий.

Requirements to accuracy of representation of geometry of not deformable products of mechanical engineering at all design stages and manufactures are defined, as well as the structure of necessary and sufficient terms for representation of geometry of products is defined.

Ключевые слова: деталь, поверхность, линии пересечения и сопряжения поверхностей, точки, системы координат.

Keywords: detail, surface, lines of crossing and interface of surfaces, points, systems of coordinates.

Введение

Рассмотрим все этапы жизненного цикла формирования геометрии машин в конструкторской и технологической документации.

Продукция машиностроения имеет материальную природу и представляется в форме изделий[1]. В последнее время сформировалось и развилось понятие о концепции CALS[2], используемое при разработке конкурентоспособной продукции. Термин CALS основан на понятии *жизненного цикла* изделия – периода времени, в течение которого формируются:

• потребность в некоторой продукции, удовлетворяющей те или иные потребности конечного числа потенциальных потребителей в конкретных условиях потребления, согласных приобрести ее за прогнозируемую ими же цену;

• требования к свойствам продукции с их качественными и количественными параметрами;

• облик будущей продукции, соответствующий этим требованиям;

• технология ее производства с приемлемыми затратами в конкретных производственных условиях, обеспечивающими не только возврат вложенных в эту продукцию средств, но и прибыль, способствующую поддержанию (развитию) системы, воспроизводящую эту продукцию.

При этом осуществляются:

• оснащение средствами производства и обеспечение материалами и комплектующими изделиями;

• производство продукции;

• маркетинг, продажа и обслуживание у покупателя произведенной продукции;

• собственно использование продукции в соответствии со служебным назначением;

• обслуживание продукции в процессе эксплуатации.

Завершается жизненный цикл утилизацией использованной и невостребованной продукции.

Все этапы проектирования облика изделия сопровождаются комплектом конструкторской и технологической документации, выполненной в соответствии с действующими нормативными документами [1].

Геометрия облика изделия формируется на ранних этапах проектирования изделий:

• технического предложения;

• эскизного проекта;

• технического проекта.

Формирование геометрии облика заканчивается на этапе рабочего проекта.

Точность описания геометрии облика изделий отличается на разных этапах его формирования.

Результатом этапа *технического предложения* (ТПредл) [2] являются чертежи общих видов компоновки машины и технические задания на эскизные проекты элементов машины, директивная технология общей сборки, технические задания на проектирование оснащения для общей сборки, транспортировки, технологического оснащения для обслуживания ма-

[1]Изделие – единица промышленной продукции, количество которой может исчисляться в штуках (экземплярах). К изделиям относят детали, комплекты, сборочные единицы, комплексы. См. ГОСТ 2.102–95.

[2]CALS расшифровывается как Continious Aquisition and Life-Cycle Support, что означает "обеспечение непрерывности поставок и жизненного цикла" или иными словами как непрерывный процесс поддержания жизненного цикла как самой продукции, так и системы, ее воспроизводящей и потребляющей.

шины в процессе эксплуатации. Точность описания геометрии находится в пределах нескольких миллиметров.

Результатом проектирования на этапе *эскизного проекта* (ЭП) [3] является номинальная геометрия неразделенных и разделенных на детали сборочных единиц, оформляемая в виде чертежей общих видов при проектных расчетах их несущей способности под действием расчетных нагрузок для выбранных материалов. Точность описания геометрии находится в пределах единиц миллиметров.

Результатом проектирования на этапе *технического проекта* (ТП) [4] является конструкторская документация, оформленная в виде чертежей общих видов, в которых представлена реальная геометрия[3] всех элементов с назначением допусков на отклонения формы и расположения сопрягаемых поверхностей всех деталей и сборочных единиц, а также технические условия (ТУ) на изготовление и приемку составных частей. Уровень подробности разработки чертежей и сопровождающих их документов на этапе ТП должен быть достаточным для разработки всего комплекта документации рабочего проекта (чертежей деталей и сборочных единиц с полным объемом технических требований). Точность описания геометрии находится в пределах долей миллиметра. В настоящее время это наименее разработанный этап проектирования. Он потребовал разработки методов моделирования величины допусков на геометрические параметры элементов изделия при наложенных ограничениях на выходные геометрические параметры с сохранением несущей способности изделия при реальной геометрии деталей и сборочных единиц и допусках на величину воздействующих нагрузок.

Рабочий проект (РП) [5] завершают выпуском комплекта рабочей документации для производства деталей и сборочных единиц. На чертежи деталей наносят всю информацию, относящуюся к представляемой на приемку каждой готовой детали, как по геометрическим параметрам, так и по параметрам свойств материала, массе, геометрии масс с допустимыми их отклонениями (допусками). На сборочные чертежи кроме всего состава выходных геометрических параметров, подлежащих техническому контролю с допусками, наносят информацию, относящуюся к выполнению соединений. Точность описания геометрии находится в пределах десятых и сотых долей миллиметра. Сборочные чертежи сопровождаются спецификациями. На чертежи деталей и сборочных единиц выносят многочисленные технические требования, определяющие правила приемки и технического контроля. Разрабатывают и дополняют *технические условия* (ТУ) на изготовление и приемку составных частей и собранного изделия.

Технологическую документацию на сборку[4] [6–9, 15] начинают разрабатывать задолго до завершения рабочего проекта. На этапе ТПредл параллельно с конструкторской документацией разрабатывают технологию общей сборки с полным комплектом технологической документации и технических заданий на разработку технологического оснащения для общей сборки.

На этапе ТП разрабатывают *технологию сборки сборочных единиц* разной сложности также с полным комплектом технологической документации и технических заданий на разработку технологического оснащения для сборки сборочных единиц. Помимо конструкторской документации на этом же этапе формируют директивный технологический процесс сборки агрегатов, формулируют технические задания на оснащение агрегатной сборки.

По завершении этапа РП разрабатывают *рабочую технологию изготовления деталей* и *технические задания на разработку инструмента и оснастки* для обработки деталей, а также *рабочую технологию агрегатной и общей сборки* [8, 9] со ссылками на разработанное (разрабатываемое) или готовое к этому времени технологическое оснащение. Этап разработки технологической документации завершается созданием полного комплекта конструкторской документации на технологическое оборудование, приспособления и инструмент для дооснащения действующего производства.

Детали изготавливают по разработанной технологии. После приемки и подтверждения соответствия геометрических параметров деталей полям допусков, назначенных по рекомендациям или смоделированных на этапе ТП и назначенных в документации на этапе РП, их передают на сборку.

При выполнении сборки осуществляют взаимное ориентирование (базирование[5]), сопряжение[6], закрепление[7] и образование соединений сопрягаемых поверхностей составных частей изделия (деталей и сборочных единиц) и обеспечивают формирование

---

[3] Реальная геометрия – геометрия изделия с учетом отклонения формы и расположения поверхностей изделия.

[4] Сборка – образование соединений составных частей изделия.

[5] Базирование – придание изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат.

[6] Сопряжение – положение составных частей изделия при сборке, характеризуемое соприкосновением их поверхностей и (или) зазором между ними, заданными в конструкторской документации.

[7] Закрепление – приложение сил и пар сил к заготовке или изделию для обеспечения постоянства их положения, достигнутого при базировании.

значений параметров собранного изделия (геометрических и физических), заданных в конструкторской документации.

Поскольку подавляющее большинство машин на ранних этапах проектирования представляют собой недеформируемые (жесткие) тела, данная статья посвящена проблеме точного описания ***реальной геометрии недеформируемых изделий и их сборке по сопрягаемым поверхностям.***

Для точного описания реальной геометрии недеформируемых изделий необходимо рассмотреть:

- точное описание реальной геометрии недеформируемой детали;
- точное описание геометрии сопряжения деталей по реальным сопрягаемым поверхностям[8];
- точное описание реальной геометрии недеформируемой сборочной единицы, собранной по реальной геометрии сопрягаемых поверхностей.

После точного описания реальной геометрии изделий можно перейти к моделированию геометрии сборки для определения оптимальных допусков на выявленные входные геометрические параметры с целью обеспечения точности собранного изделия при наложенных ограничениях на выходные геометрические параметры.

1. Геометрия изделий машиностроения

1.1. Необходимость совершенствования нормативной базы

Нормативная база представления геометрии изделий в проектной конструкторской и технологической документации, изложенная в действующих основополагающих стандартах [10–12], отстала от требований времени и требует совершенствования.

Ряд действующих нормативных документов определяет основные понятия, связанные с совокупностью перечисленных вопросов. Каждый из них в отдельности при прочтении сразу не вызывает возражений, однако при рассмотрении их совместно возникает сомнение в их согласованности.

После внимательного (не постраничного, поабзацного, пословного, а побуквенного) прочтения перечисленных документов возникает ряд вопросов.

1. Как человеку представить в своем сознании геометрию поверхностей, ограничивающих окружающие людей тела материального мира? Этим занялась "Ее величество" математика.

2. Как измерить все понятия, связанные с геометрией поверхностей, сформированные математиками? Этим занимается метрология.

3. Как отобразить представленную в сознании человека геометрию поверхностей в виде геометрических образов на твердом носителе графической информации (от плоских каменных плит до листов бумаги) и в форме трехмерных виртуальных наблюдаемых образов? Этим занималась и занимается инженерия.

4. Как согласовать абстрактное представление о геометрии поверхностей, представленных в сознании человека, проектирующего облик изделия и представляющего результаты проектирования в виде абстрактных геометрических образов с реальностью, получаемой при изготовлении этих же поверхностей? Этим занимается технология.

5. Как все эти представления о геометрии активно использовать при проектировании облика изделия и технологии его производства? Этим занимаются системы поддержки проектирования в САПР средствами IT технологий.

6. Как согласовать и гармонизировать все проблемы представления, измерения, отображения и моделирования геометрии изделий? Этим должна заниматься стандартизация, создавая нормативную базу.

Об этих насущных вопросах думали издавна (еще от Аристотеля и даже намного раньше) многие поколения великих ученых и великих инженеров. На определенных этапах развития общества (культуры, науки) заинтересованные люди устанавливали некоторые правила, оформленные в виде нормативных документов (стандартов).

Каковы причины пробелов и недостатков в существующих нормативных документах?

1. Более чем двухвековые (от идей Монжа[9]) усилия поколений инженеров были связаны с проекционным представлением на плоскости линий пересечения поверхностей, ограничивающих объемы тел. Поверхность могла быть представлена только набором ее сечений плоскостями, параллельными одной из плоскостей проекций или расположенными определенным образом в пространстве в соответствии с проекциями указаний на вид этой плоскости сечения по стрелке, привязанной к плоскостям проекций. Это затрудняло представление абстрактного образа поверхности в пространстве без ее физического построения в виде макета, эталона или так называемых "калибра и контркалибра поверхности" [13, 17, 18, 20].

[8]Сопрягаемая поверхность – поверхность детали, образующая сопряжения при сборке.

[9]Монж (Monge) Гаспар (1746–1818) – франц. геометр, творец начертательной геометрии. 1780 г. – член парижской академии; участник комиссии установления метрической системы мер и весов; 1792 г. – морской министр; в 1798 г. участвует в египетской экспедиции Бонапарта. Основные труды – "Traite de Statique" (1788), "Geometrie descriptive" (1795).

2. Отсутствует приемлемый математический аппарат представления геометрии сложных поверхностей и вычислительных средств, позволяющих проводить оперативное изменение форм и размеров поверхности при ее проектировании.

3. Метрология связана с несовершенством "двухточечных" средств измерения и основана на весьма трудоемком измерении расстояний (координат) до характерных точек поверхности и углов между направлениями к ним в выбранной системе координат[10].

4. Имеет место человеческий страх перед сложностью представления и вычисления элементарных понятий, связанных с геометрией поверхностей.

5. Люди ленятся напрягаться для освоения и использования новых представлений (абстракций) для использования в своей практической деятельности (хлеб и зрелища вместо упорного труда).

А что нового появилось за последние годы после утверждения перечисленных стандартов?

Во-первых, появилась и быстро развилась трехмерная (3D) компьютерная графика, нашедшая широкое техническое и технологическое применение.

Во-вторых, существенно изменилась техническая метрология. Вместо двухточечных измерений с помощью простейших средств однокоординатных линейных и угловых измерений (штангенциркуль, микрометр, квадрант) стали стремительно развиваться трехкоординатные (пространственные) измерения координат точек реальных поверхностей в системах координат системы измерения координатно-измерительных машин (КИМ).

А что может сегодня компьютерная графика? Оперировать с поверхностями номинальной формы или, что не лучше, твердотельными (Solid) моделями, которые не позволяют представить и моделировать объемы реальных тел и сопряжение деталей с реальными сопрягаемыми поверхностями, имеющими, в отличие от номинальных поверхностей, отклонения формы и расположения.

А что могут сделать КИМ с "облаками измеренных точек" каждой поверхности? Ведь по утвержденным в нормативной документации правилам нужно определить значения тех параметров, которые определяют форму и положение реальных поверхностей детали, заложенные в конструкторской документации, и сопоставить их с диапазоном допустимых отклонений.

А по каким правилам? По правилам, отражающим примитивное представление о геометрии простых контуров сечений (прямая линия и круг) и простых деталей, ограниченных плоскими и цилиндрическими поверхностями, связанными со способами двухточечного измерения их простейшими средствами технической метрологии, основанных на существующей нормативной документации. Все остальное множество контуров сечений и поверхностей не охвачено нормативной документацией.

Если разработать систему правил отображения реальной геометрии с широким использованием возможностей и средств современной математики и компьютерной графики, то можно перейти к моделированию геометрических параметров технических изделий. Опираясь на технологию формирования отклонений формы поверхностей, можно моделировать и получить исходные данные для формирования допусков, которые в свою очередь обеспечивают требуемое качество продукции при оптимальных затратах основных ресурсов (времени, трудоемкости и стоимости), т.е. можно перейти от гадания (угадывания) к неограниченному и всестороннему моделированию реальной геометрии элементов конструкции.

Подводя итоги проведенного анализа достоинств и недостатков существующих (действующих) основополагающих стандартов, связанных с основными понятиями о геометрии изделий, можно поставить следующие задачи:

- ввести в терминологию представления геометрии фундаментальные, проигнорированные и частично забытые понятия о системах координат, в которых представляется как плоская геометрия сечений поверхностей плоскостями различного направления, так и пространственная геометрия множества поверхностей;
- провести поиск строгих определений терминов, не вошедших в список общих терминов и определений стандарта ГОСТ 24642–81 [10];
- дополнить этот список новыми терминами и определениями и согласовать их, исключив противоречия, возникшие при анализе вновь создаваемого нормативного документа;
- разработать предложения по изменению стандартов [10, 11], связанных с представлениями о номинальной и реальной геометрии изделий, согласовав их друг с другом.

Решения задач о геометрии реальных элементов геометрии изделий (линий и поверхностей) и их отображении при проектировании облика геометрии поверхностей изделий и контроле их геометрии после

[10] Выбранная система координат – система координат, в которой определяют координаты всех точек поверхностей, ограничивающих объем элементов конструкции. Такими системами координат являются системы координат элементов конструкции и изделия в целом, системы координат системы измерения при контроле геометрических параметров и параметров геометрии масс, системы координат движения инструментов при осуществлении технологических процессов и т.п.

изготовления связаны с выбором отсчетных элементов, который должен соответствовать следующим принципам:

• он должен быть пригодным для линий, поверхностей (элементов) любой формы и величины;

• расположение отсчетных элементов по отношению к их реальному положению должно определяться по одинаковому для всех элементов алгоритму;

• суждение о величине, форме и положении реальных элементов формируется по результатам измерения в системе координат системы измерения;

• погрешности формы и расположения элементов формируются по сравнению с их номинальной величиной и относительным (номинальным) расположением в технической документации.

Таким образом, актуальность предстоящей работы состоит в ***обосновании и применении для формирования моделей представления геометрии в технических приложениях более адекватного выбора элементов, отображающих номинальные и реальные поверхности и профили их сечений, позволяющих построить математические модели реальных объемов деталей и сопряжения (сборки) их друг с другом.***

1.2. Понятия, связанные с геометрией детали

Попытаемся навести элементарный порядок в терминах и определении основных понятий, относящихся к геометрии объектов производства – изделий, который не был обеспечен в действующих нормативных документах.

Итак, на первом этапе предметом исследования является точное описание геометрии детали.

Деталь – тело, ограниченное от окружающей среды поверхностями. Поверхности детали пересекаются или сопрягаются по ребрам или линиям сопряжения. В местах пересечения более чем двух поверхностей, а также двух линий сопряжений между ними образуются точки пересечения.

К числу понятий и определений, которые не противоречат современным представлениям о геометрии изделий, в качестве справочного материала для дальнейшего понимания содержания статьи следует отнести следующий ряд терминов, позаимствованных из непрерывно обновляющегося и освежающегося источника информации в Интернете – свободной энциклопедии "Википедия".

Первый термин, встречающийся при представлении геометрии объектов – ***пространство.*** Что это такое?

В математике слово "пространство" употребляется в большом наборе сложных терминов. Пространство есть множество с некоторой *дополнительной структурой*.

В зависимости от этой дополнительной структуры элементы пространства могут называться "точками", "векторами", "событиями" и т.п. В математике, как науке, рассматривается несколько видов пространств, среди которых наиболее приемлемо для технических приложений Евклидово пространство, которое можно считать современной интерпретацией и обобщением (так как оно допускает размерности больше трех) классической (Евклидовой) геометрии. Для технических приложений, связанных с геометрией объектов производства, ограничимся размерностью $n \leq 3$.

Положение элементов геометрии в пространстве определяется в некоторой ***системе координат,*** представляющей собой комплекс определений, реализующий метод координат, т.е. способ определения положения точки или поверхности тела в пространстве с помощью чисел или других символов.

В математике координаты – совокупность чисел, сопоставленных точкам многообразия в некоторой карте определенного атласа. Совокупность чисел, определяющих положение конкретной точки, называется координатами этой точки.

Положение любой точки P в пространстве (в частности, на плоскости) может быть определено при помощи той или иной системы координат. Числа, определяющие положение точки, называются *координатами* этой точки.

Наиболее употребительная координатная система – *декартова прямоугольная система координат*. Обобщением всех перечисленных систем координат являются *криволинейные системы координат*.

На плоскости применяют *полярные* системы координат, а в пространстве – *цилиндрические* или *сферические* системы координат.

Термины, которые не противоречат современным представлениям о геометрии изделий, следует дополнить следующими терминами и понятиями.

Точка – одно из фундаментальных понятий геометрии. В Евклидовой геометрии "точка" не имеет определения. Есть, правда, шутливое определение, данное учителями математики дореволюционных гимназий: точка есть то, часть чего есть ничего. Тем не менее, понятие точка является родительницей понятий линия и поверхность.

Линия – геометрическое понятие, определяемое в разных разделах геометрии различно.

В элементарной геометрии понятие кривой не получает отчетливой формулировки и иногда определяется как "длина без ширины" или как "граница фигуры". В элементарной геометрии нет определения понятия "прямая линия".

Линия на плоскости определяется как множество точек, координаты которых удовлетворяют уравнению $F(x, y) = 0$.

Линия в пространстве может быть представлена в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} F_1(x,\ y,\ z)=0 \\ F_2(x,\ y,\ z)=0\,. \end{cases}$$

Дифференциальная геометрия занимается исследованием гладких пространственных и плоских кривых в евклидовом пространстве аналитическими методами.

Наиболее общий способ задать уравнение *пространственной кривой* – параметрический:

$$x = x(t),\ y = y(t),\ z = z(t),$$

где $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ — гладкие функции параметра t, причем $(x')^2 + (y')^2 + (z')^2 > 0$ (условие регулярности).

В технической литературе для плоских сечений и линий широко используют термины ***контур сечения*** и ***профиль.***

Профиль реального контура подавляющего большинства сечений поверхностей можно представить как сумму бесконечно большого числа гармоник, имеющих разные амплитуды и фазы (интегралом Фурье для непериодических функций или рядом Фурье для периодических). Наиболее компактным обобщением представления формы реального контура сечения является амплитудно-фазо-частотные характеристики (АФЧХ). Его же можно представить непрерывной линией или рядом дискретных значений координат точек этого профиля. В зависимости от требуемой точности восстановления контура по теореме Котельникова [14] можно определить шаг дискретизации Δx, выбрав наибольшую (верхнюю) частоту гармоники из спектра частот для непериодических функций или верхнюю гармонику для периодических. Для выбранной гармоники число дискретных значений на каждом периоде верхней гармоники должно быть более двух.

Поверхность (по данным из Википедии) – традиционное название для двумерного многообразия в пространстве. Поверхность имеет площадь, но не имеет толщины.

Поверхности, как и линии в аналитической и алгебраической геометрии, могут быть представлены множеством точек, координаты которых удовлетворяют определенному виду уравнений:

$$F(x,\ y,\ z)=0. \qquad (1)$$

Если функция $F(x, y, z) = 0$ в некоторой точке и имеет в ней непрерывные частные производные, при этом по крайней мере одна из них не обращается в нуль, то в окрестности этой точки поверхность, заданная уравнением (1), будет *правильной поверхностью.*

Помимо указанного неявного способа задания поверхность может быть определена явно, если одну из переменных, например z, можно выразить через остальные:

$$z = f(x,\ y).$$

Поверхность в машиностроении является первичным элементом конструкции любой машины. Поверхности ограничивают объем изделий, по поверхностям осуществляется сборка, поверхности машин соприкасаются друг с другом и взаимодействуют с окружающей средой. Поверхность в машиностроении рассматривают как непрерывное множество точек, координаты которых в собственной системе координат поверхности O, X, Y, X связаны зависимостью вида $F(x, y, z) = 0$.

В зависимости от вида функции поверхности подразделяют на *алгебраические* и *трансцендентные*. Алгебраические поверхности различают по степеням n уравнений, их описывающих (поверхности n-го порядка).

Существует два способа образования указанных семейств: *кинематический* и *каркасный* [20]. При кинематическом способе поверхность рассматривается как геометрическое место точек, образованное путем перемещения в пространстве образующей (a) по направляющей (m) в соответствии с алгоритмом $\{A\}$.

С точки зрения кинематики образования поверхностей их подразделяют на классы, подклассы, группы, подгруппы. Выделено два класса поверхностей: нелинейчатые (I) и линейчатые (II); три подкласса: параллельного переноса (1), вращения (2) и винтовые (3); пять групп в соответствующих классах: с образующими переменного вида (АI), постоянного вида (БI), с направляющими – тремя (АII), двумя (БII) и одной (ВII).

В число независимых условий, однозначно определяющих (задающих) поверхность, включают:

- геометрические фигуры (точки, линии, поверхности), с помощью которых может быть образована поверхность (Г);
- алгоритмы формирования поверхности из геометрических фигур {А}.

Таким образом, кинематическое представление поверхности может быть отображено определителем вида Ф(Г){А}.

Наиболее общую форму имеют *нелинейчатые* поверхности с переменными образующими (АI),которым соответствует определитель Ф(a, m) {А, А1}.

Все *линейчатые* поверхности образуются прямолинейными штрихами по разным алгоритмам перемещения этих штрихов в пространстве. В самом общем случае для реализации любой линейчатой поверхности достаточно задать линию этой поверхности в виде

функции $S(x, y, z) = 0$ и направляющие косинусы образующей $l(s)$, $m(s)$, $n(s)$.

Из линейчатых поверхностей интерес представляют *поверхности, развертывающиеся на плоскость* (группа BII). К ним относятся коническая, цилиндрическая поверхности и поверхность с ребром возврата. Указанные поверхности могут быть получены из плоскости путем ее изгиба или скручивания. Достаточно широкое применение в машиностроении находят поверхности винтовые и параллельного переноса.

Подклассы поверхностей могут быть реализованы как линейчатыми, так и нелинейчатыми образующими. Частным (вырожденным) случаем поверхностей всех классов является *плоскость.*

Поверхности элементов конструкции машин весьма разнообразны. Они могут быть составными, т.е. состоять из набора элементарных поверхностей перечисленных классов или, будучи весьма сложными, неделимыми на составные, состоять из одной поверхности (например, художественное литье).

Кроме традиционного задания поверхности как функции $F(x, y, z) = 0$ существует и параметрический способ задания двумерного многообразия – наиболее удобный для представления сложных поверхностей. В этом случае поверхность определяется системой уравнений:

$$\begin{cases} x = x(u, \mathrm{v}), \\ y = y(u, \mathrm{v}), \\ z = z(u, \mathrm{v}). \end{cases} \qquad (2)$$

Поверхность можно считать непрерывным двухпараметрическим множеством точек, широко используемым в компьютерной графике [16, 19]. Методы параметрического описания поверхностей наиболее удобно представляются в терминах отображения двухпараметрической поверхности из параметрического пространства u, v в трехмерное объектное пространство O, X, Y, Z (рис. 1).

При параметрическом описании любой искривленной поверхности каждая из функций u или v параметрического представления поверхности могут быть также представлены интегралом Фурье для непериодических функций или рядом Фурье для периодических. Они могут быть дискретизированы (представлены набором точек) по теореме Котельникова и восстановлены в зависимости от требуемой точности. Восстановление исходных функций u и v можно осуществить либо ***вычислением всего состава частот, амплитуд и сдвига фаз каждой частоты с последующим их суммированием,*** либо ***интерполированием.***

Наиболее известными способами интерполирования, используемыми в машиностроении, являются

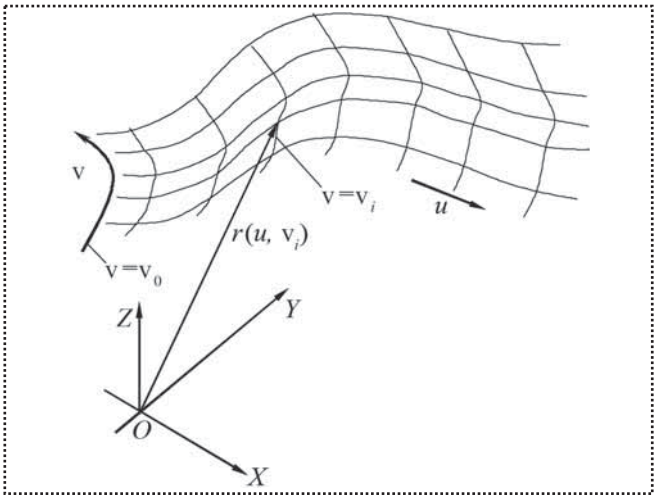


Рис. 1. Представление поверхности в параметрической форме

полиномиальная интерполяция и ***интерполяция сплайнами.***

Полиномиальная интерполяция является наиболее известным из методов одномерной интерполяции. Ее достоинствами являются простота реализации и хорошее качество получаемых интерполянтов. В простейшем варианте интерполирования полиномами Лагранжа, когда функция $y(x)$ задана в узлах некоторой сетки x_i, параметры $\bar{a}$ определяют из условия совпадения $\varphi(x, \bar{a})$ со значениями функции в фиксированном числе узлов. Степень лагранжевого полинома на единицу меньше узловых числа точек профиля сечения. Такие полиномы проходят через точки узлов, однако между узлами их поведение сопровождается осцилляциями (всплесками). Исключение таких осцилляций возможно при понижении степени полинома за счет ограничения количества точек, через которые проходит интерполирующий полином. Для этого всю совокупность точек разбивают на группы, соответствующие степени полинома и на граничных точках определяют условия сглаживания полученных отрезков интерполирующих полиномов (интерполянтов).

При формировании обводов летательных аппаратов контур сечения обвода представляют отрезками дуг, проходящих через точки дискретизированного контура. В аэрокосмической технике длительное время использовалось интерполирование контуров сечений поверхностей по заданным координатам точек этих сечений отрезками кривых второго порядка [17]:

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0. \qquad (3)$$

Определения коэффициентов a, b, c, d, e, f уравнения дуг (3) осуществлялось по координатам трех узлов (двух узлов на границах дуги и одного промежуточно-

го узла). На стыках дуг имел место разрыв производной линии контура, приводящий к нарушению плавности обвода. Поэтому требовалось вычисление и назначение значений производных в узлах границ дуги.

В современных технических приложениях [16, 19] наиболее приемлемо ***интерполирование сплайнами*** – приближенными математическими аналогами гибких деревянных или металлических реек – лекал с постоянной жесткостью, используемых чертежниками для построения кривых, соединяющих заданные точки.

Сплайн обладает тем свойством, что в точках каркаса кривизна его не претерпевает разрыва. Это свойство приводит к тому, что функция $Y(x)$ между соседними точками каркаса представляет собой кубический полином вида

$$F(x) = ax^3 + bx^2 + cx + d = 0. \qquad (4)$$

Кубический сплайн более удобно представлять в явном виде, содержащим координаты точек каркаса:

$$Y(x) = [S_{i-1}(x_i - x)^3 + S_i(x - x_{i-1})^3]/6(x_i - x_{i-1}) +$$
$$+[y_{i-1}/(x_i - x_{i-1}) - S_{i-1}(x_i - x_{i-1})]/6(x_i - x) +$$
$$+[y_i/(x_i - x_{i-1}) - S_i(x_i - x_{i-1})]/6(x - x_{i-1}),$$

где x_{i-1}, y_{i-1}, x_i, y_i – координаты точек на концах отрезка $x_{i-1} < x < x_i$ ($i = 0, 1, ..., n$);

S_{i-1}, S_i – кривизна на концах отрезка, определяемая по всей совокупности точек каркаса и граничным условиям на концах образующей.

Условия на концах могут быть следующими:

1) свободные концы: нулевая кривизна сплайна в точках $X(0)$ и $X(n)$ – *естественный сплайн*

$$S(0) = S(n);$$

2) заделанные концы: определены первые производные в $X(0)$ и $X(n)$ – *закрепленный сплайн:*

$$Y'[X(0)] = G(0),\ Y'[X(n)] = G(n);$$

3) квадратичные концевые отрезки:

$$S(0) = S(1),\ S(n-1) = S(n).$$

Последний случай, как и первый, не требует определения или знания производных на концах интерполируемой кривой. Эти сплайны называют также *слабыми*.

Наиболее удобным интерполированием, обеспечивающим как гладкость контура образующей, так и относительную простоту вычислений, является интерполирование закрепленными и незакрепленными (слабыми) кубическими сплайнами незамкнутых контуров образующих и циклическими или ациклическими кубическими сплайнами – замкнутых контуров, ***обеспечивающими непрерывность их второй производной по всему профилю (кривой).*** Интерполирование сплайнами принято в современном машиностроении.

Множество линий *u* и v или точек, определяющих поверхность, называют ***каркасом.*** Теория каркаса основана на том, что непрерывное однопараметрическое множество линий в пространстве задает поверхность и, обратно, всякая поверхность может быть представлена однопараметрическим множеством линий, свойства которых и расположение в пространстве определяют свойства поверхности. Каркасы подразделяют на *линейные* и *точечные* в зависимости от того, чем задается каркас поверхности.

Линейный каркас представляет собой множество линий, имеющих единый закон образования (закон каркаса) и связанных между собой определенными зависимостями (зависимостями линий каркаса с параметрами каркаса). В качестве линий, образующих каркас, принимают семейство плоских линий, полученных сечением поверхности параллельными плоскостями.

Определение координат произвольных точек поверхности по заданным точкам, через которые проходит сечение (профиль) данной поверхности, осуществляют с помощью одномерного интерполирования функции $F(x, y) = 0$, заданной точками $x(i)$, $y(i)$ ($i = 0, 1, ..., n$). На практике применяют несколько способов интерполяционного описания линий, соединяющих узлы каркаса. Наиболее известным из них является интерполяция уравнениями второго порядка, широко использовавшаяся в теории и практике плазово-шаблонного метода производства в самолетостроении.

Точечный каркас представляет собой в самом общем случае множество произвольно расположенных точек поверхности, на которые "натягивается" упругая гладкая поверхность.

Точечный каркас можно получить в виде множества узлов пересечения линий, образованных двумя ортогональными семействами параллельных плоскостей, пересекающих поверхность.

Для того чтобы судить о форме поверхности, ее часто задают каркасом, образованным двумя ортогональными семействами плоских сечений. Такие сечения разбивают поверхность на совокупность криволинейных четырехугольных *порций*, каждую из которых можно однозначно описать с помощью уравнения (1) [16, 19–22].

Поверхности представляют в параметрической форме сеткой *u*v сплайнов упругой оболочки, не имеющей толщины, натянутой на узлы сетки. Форму поверхности в математическом и механическом смысле обеспечивают координаты точек узлов и моменты, приложенные в узлах сетки, направленные по

нормали к поверхности и деформирующие упругую оболочку (рис. 2).

В современной технике используют поверхности, заданные каркасом точек и правилами интерполирования. Это в равной степени относится как к образующим поверхностей вращения, так и к каркасным поверхностям. Такие поверхности используются в конструкциях летательных аппаратов и двигателей к ним, кораблей, автомобилей.

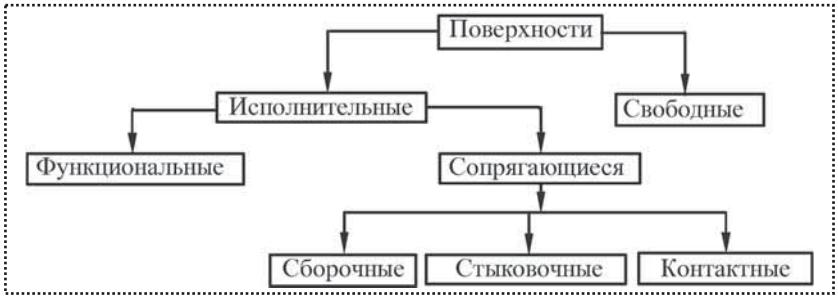


Рис. 3. Классификация поверхностей конструкций по функциональным признакам

Поверхности изделий состоят из набора элементарных поверхностей, которые группируют по следующим функциональным признакам [20] (рис. 3).

С точки зрения назначения в конструкции их разделяют на исполнительные и свободные.

С помощью **исполнительных поверхностей** деталь, сборочная единица или изделие в целом выполняют свое служебное назначение.

Исполнительные поверхности подразделяют на *функциональные,* соприкасающиеся с потоками рабочих сред, участвующие в парах трения и т.п., и *сопрягающиеся*. Последние называют также *сборочными, стыковочными, контактными.* Они сопрягаются с поверхностями других деталей и сборочных единиц, а также элементами технологического оснащения (ТО). Свойства исполнительных поверхностей, например, ракетно-космических систем (РКС) имеют большое значение для успешного функционирования различных элементов конструкций. Геометрия наружной поверхности РКС определяет характер аэродинамического и теплового воздействия на конструкцию, а также влияет на компоновку агрегатов внутри РКС. Геометрия поверхности сопла ракетного двигателя формирует реактивную силу, разгоняющую и движущую РКС. Геометрия внутренней поверхности топливных баков определяет объем топлива в ракетных блоках. В конструкциях исполнительных органов управления РКС имеется значительное число деталей с сопряженными поверхностями, которые участвуют в движении относительного скольжения и качения. Геометрия поверхностей деталей и сборочных единиц, сопрягаемых при сборке, существенным образом влияет на точность их пространственного расположения в конструкции, уровень напряжений и многие другие показатели качества сборки.

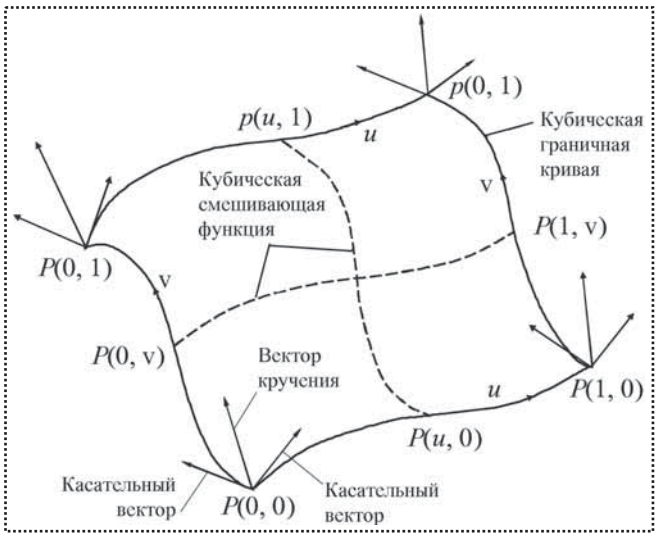


Рис. 2. Геометрия куска бикубической поверхности Кунса [22]

Свободные поверхности деталей машин выполняют вспомогательные функции, завершая формирование объемов элементов конструкции необходимыми скруглениями и фасками, облегчающими сборку и снижающими концентрацию напряжений, обеспечивают требуемую несущую способность при рабочих нагрузках, влияют на распределение массы и геометрию масс в объемах элементов конструкции.

Термин ***элемент*** является обобщающим для поверхности, линии, точки.

Понятие ***форма элемента*** во всех рассмотренных стандартах осталось открытым. Координаты непрерывного множества точек элемента (линии или поверхности) в выбранной системе координат задают его форму, характеризуемую направлением *нормали*[11] к элементу в каждой его точке и его *кривизной*[12]. У подавляющего большинства плоских профилей сечений поверхностей и поверхностей деталей современных машин кривизна профиля отлична от нуля. Только у прямой линии и плоскости она равна нулю.

[11]Нормаль – прямая, ортогональная (перпендикулярная) касательной прямой к некоторой кривой или касательной плоскости к некоторой поверхности.

[12]Кривизна – собирательное название ряда количественных характеристик (скалярных, векторных, тензорных), описывающих отклонение того или иного геометрического "объекта" (кривой, поверхности, риманова пространства и т.д.) от соответствующих "плоских" объектов (прямая, плоскость, евклидово пространство и т.д.).

Координаты множества точек элемента определяют его ***величину,*** ошибочно заменяемую понятием ***размер.***

Определение понятия размера впервые дано в стандарте ГОСТ 25346–89. По этому стандарту размер – числовое значение линейной величины (диаметра, длины, угла и т.п. геометрических параметров) в выбранных единицах измерения. Такое определение не полностью соответствует понимаемому по умолчанию термину величина элемента, подменяя или заменяя его понятием размер параметра элемента.

Формулировка определения понятий терминов ***форма элемента, величина элемента*** представляется весьма дискуссионными, и пытаться осуществить ее в рамках данной работы не целесообразно. Возникла мысль объединить эти термины в объединении понятий форма и величина (не путать с понятием размер) объединяющим их понятием ***геометрия элемента в системе координат элемента.***

Выводы

1. Проведен анализ требований к точности представления геометрии изделий машиностроения на всех этапах ее формирования в технической (конструкторской и технологической) документации. Показано, что требования к наиболее полному и точному представлению информации о геометрии изделий относятся к наименее разработанному в стандартах ЕСКД этапу ТП, в котором формулируются требования к точности геометрии изделия и сопрягаемых поверхностей, удовлетворяющие ограничениям, наложенным на выходные геометрические параметры.

2. Поскольку подавляющее большинство машин на всех этапах жизненного цикла изделия представляют собой недеформируемые (жесткие) тела, первостепенными задачами точного описания геометрии недеформируемого изделия являются:

- *точное описание реальной геометрии недеформируемой детали,*
- *точное описание геометрии сопряжения недеформируемых деталей по реальным сопрягаемым поверхностям,*
- *точное описание реальной геометрии недеформируемой собранной сборочной единицы и изделия в целом.*

3. На основе анализа литературных источников составлен словарь понятий, необходимых и достаточных для современного представления геометрии детали.

Библиографический список

1. **ГОСТ 3.1102–81.** Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/1417.htm.

2. **ГОСТ 2.118–73.** Единая система конструкторской документации. Техническое предложение. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/5518.htm.

3. **ГОСТ 2.119–73.** Единая система конструкторской документации. Эскизный проект. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/5534.htm.

4. **ГОСТ 2.120–73.** Единая система конструкторской документации. Технический проект. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/5568.htm.

5. **ГОСТ 2.109–73.** Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/5499.htm.

6. **ГОСТ 3.1102–81.** Единая система технологической документации. Стадии разработки и виды документов. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/1417.htm.

7. **ГОСТ 3.1118–82.** Единая система технологической документации. Формы и правила оформления маршрутных карт. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/29871.htm.

8. **ГОСТ 3.1128–93.** Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Общие правила выполнения графических технологических документов. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/4972.htm.

9. **ГОСТ 3.1105–84.** Межгосударственный стандарт. Единая система технологической документации. Формы и правила оформления документов общего назначения. URL: http://www.docload.ru/Basesdoc/11/11609/index.htm.

10. **ГОСТ 24642–81.** Основные нормы взаимозаменяемости. Допуски формы и расположения поверхностей. Основные термины и определения. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/22152.htm.

11. **ГОСТ 25142–82.** Шероховатость поверхности, термины и определения. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/43751.htm.

12. **ГОСТ 21495–76.** Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения. URL: http://www.docload.ru/standart/Pages_gost/33999.htm.

13. **Григорьев В.П.** Взаимозаменяемость агрегатов в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1969. 260 с.

14. **Котельников В.А.** О пропускной способности эфира и проволоки в электросвязи – Всесоюзный энергетический комитет // Материалы к I Всесоюзному съезду по вопросам технической реконструкции дела связи и развития слаботочной промышленности, 1933. Репринт статьи // Успехи физических наук. 2006. С. 762–770.

15. **Р 50-54-93–88.** Рекомендации. Классификация, разработка и применение технологических процессов. URL: http://www.normacs.com/doc/d1005175/.

16. **Роджерс Д., Адамс Дж.** Математические основы машинной графики / Пер. с англ. М.: Мир, 2001.

17. **Технология** самолетостроения / А.Л. Абибов, Н.М. Бирюков, В.В. Бойцов и др. М.: Машиностроение, 1970. 600 с.

18. **Технология** сборки и испытаний космических аппаратов: учеб. для высших технических учебных заведений / И.Т. Беляков, И.А. Зернов, Е.Г. Антонов и др.; под общ. ред. И.Т. Белякова и И.А. Зернова. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

19. **Фокс А., Пратт М.** Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 304 с.

20. **Фролов С.А.** Начертательная геометрия. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.

21. **Ferguson J.C.** Vuxtivariabxe curve interpoxation. Report No D2-22504, the Boeing Co., Seattxe. Washington, 1963.

22. **Coons S.A.** Surfaces for computer aided of spase forms. Report MAC-TR- 41, Projekt MAC, M.I.T. 1967.

УДК 621.757

Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, *д-ра техн. наук*
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: kgta_tms@mail.ru

Ручной одношпиндельный гайковёрт ударного действия повышенной точности с системой контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений

Обоснована модернизация ручных одношпиндельных гайковертов ударного действия за счет введения электромеханической системы контроля точности осевых сил затяжки резьбовых соединений по углу поворота шпинделя, что позволило повысить точность затяжки не менее чем в шесть раз.

Modernisation manual single-spindle screwdriver shock action, for the account of introduction of the electromechanical monitoring system of accuracy of axial forces of an inhaling of carving connections on a corner of turn of a spindle that has allowed to raise accuracy of an inhaling not less than in 6 times is proved.

Ключевые слова: гайковерт, кинематическая схема, точность, осевые силы, затяжка.

Keywords: screwdriver, kinematic scheme, accuracy, axial forces, an inhaling.

В работе [1] доказано, что при контроле качества сборки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами ударного действия по моменту затяжки, определяемого числом ударов бойка о наковальню, возникают значительные погрешности, составляющие 25 % и более от номинального значения.

Только контроль качества сборки по углу поворота шпинделя может гарантировать высокую точность.

Не изменяя конструкции ударного гайковерта [2] введем электромеханическую систему контроля угла поворота шпинделя.

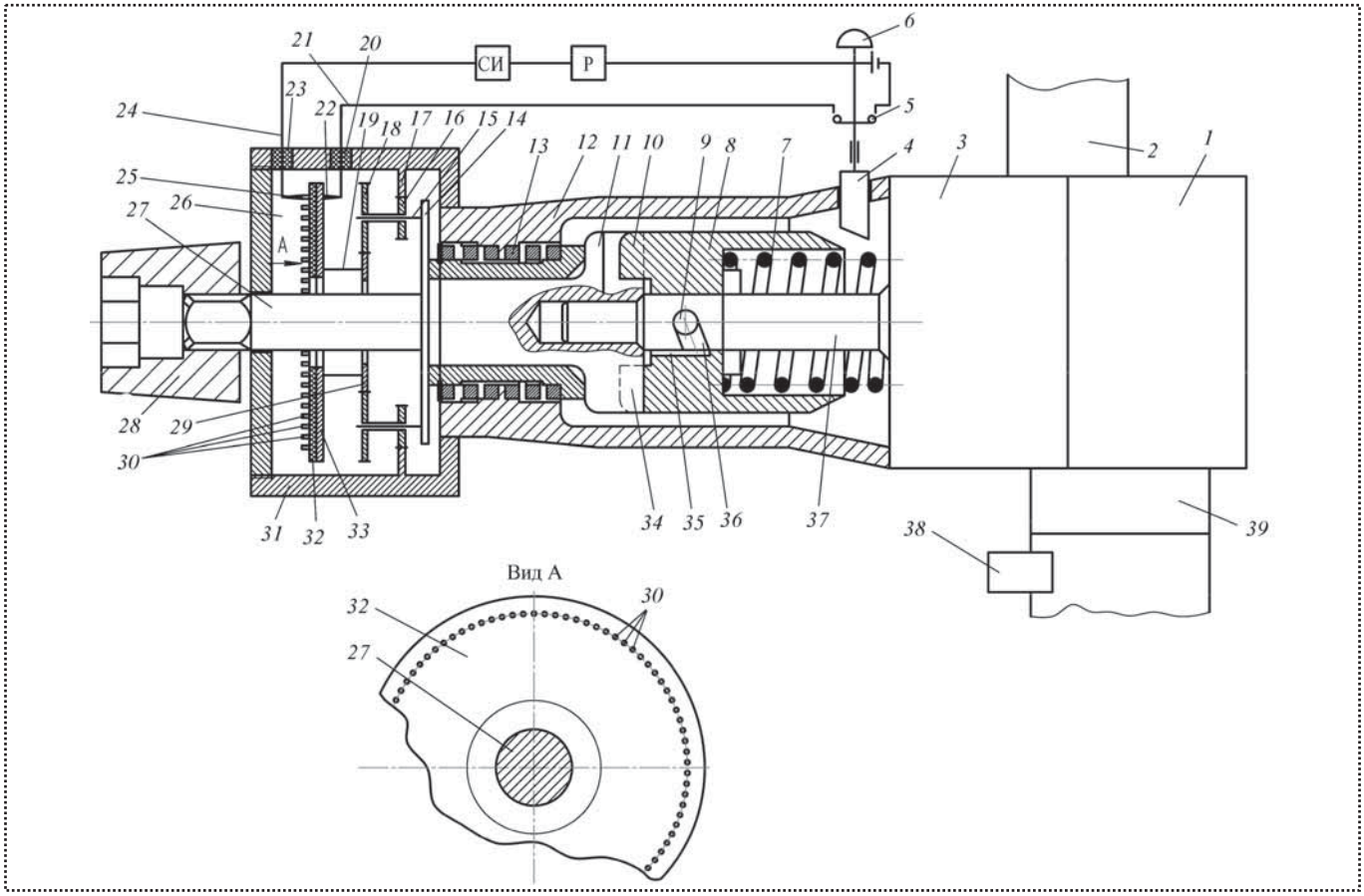
Кинематическая схема гайковерта с системой контроля осевых сил затяжки по углу поворота резьбовой детали представлена на рисунке.

Ударный механизм гайковерта размещен в корпусе *12* и содержит боек *8* с рабочими кулачками *10*, поджатый пружиной *7*, и наковальню *11* с рабочими кулачками *34*, выполненную за одно целое со шпинделем *27*. На приводном валу *37* выполнены спиральные канавки *36*, а на бойке *8* – кулачковые поверхности, взаимодействующие с шариками *9*. Планетарный редуктор *3* также размещен в корпусе, который через промежуточный щит соединен с двигателем *1*. Гайковерт снабжен основной рукояткой *39* с пусковым крючком *38* и дополнительной съемной рукояткой *2*. Измерение угла поворота резьбовой детали (угла затяжки) осуществляется на основе мультипликатора, построенного на базе планетарного редуктора и модуляционного диска.

В мультипликатор входит водило, состоящее из диска *14*, жестко закрепленного к шпинделю *27*, и осей *15*, на которых расположены сдвоенные шестерни *16* и *18*, неподвижное колесо *17* с внутренним зацеплением, взаимодействующее с шестерней *18*, и подвижное зубчатое колесо *29*. К колесу *29* стержнями *19* жестко закреплен модуляционный диск, состоящий из металлического – *33* и пластмассового – *32* дисков. Металлический диск снабжен контактными штырями *30*, а пластмассовый диск является изоляционным материалом. Проводники *21* и *24* электрической системы измерения угла поворота шпинделя проходят через корпусную деталь *31* по изолированным втулкам *20*, *23* и оканчиваются контактами *22* и *25*. В момент взаимодействия контактов *22* и *25* с контактным штырем *30* замыкается электрическая цепь системы измерения угла, и счетчик импульсов *СИ* отсчитывает импульсы. При достижении требуемого числа импульсов срабатывает реле *Р*, отключающее питание электродвигателя *1* гайковерта.

Гайковерт работает следующим образом. После захвата торцевой головкой *28* гайки (болта) и включении электродвигателя *1* вращение через планетарный редуктор *3* передается на вал *37* к бойку *8*, а далее через наковальню *11*, кулачки *10* которой сцеплены с кулачками *34* и вращаются как единое целое, вращение передается на шпиндель *27* к резьбовой детали. При малом моменте сопротивления вся система вращается как единое целое.

Как только сопротивление в резьбовой паре превысит величину, которая определяется в основном силой предварительного сжатия пружины *7*, углом



Одношпиндельный гайковерт ударного действия высокой точности осевых сил затяжки

наклона спиральных канавок *36* и кулачковой поверхности *35*, боек *8* начинает отставать во вращательном движении от приводного вала *37*, и в результате взаимодействия шариков *9*, канавок *36* и кулачковых поверхностей *35* перемещается в осевом направлении от шпинделя-наковальни *11*, сжимая пружину *7*. Осевое перемещение бойка *8* продолжается до тех пор, пока не расцепятся рабочие кулачки *10* и *34*. После расцепления кулачков под действием пружины *7* вращающийся боек *8* перемещается по направлению к шпинделю-наковальне *11* и западает своими рабочими кулачками *10* между рабочими кулачками *34* шпинделя-наковальни *11*. При этом кинетическая энергия вращающегося бойка *8*, в которую преобразовалась работа двигателя *1* и накопленная работа силы от деформации пружины *7*, посредством вращательного удара передается на шпиндель-наковальню *11* и через торцевую головку *28* – к затягиваемому соединению, где преобразовывается в работу затяжки. Боек *8* и шпиндель-наковальня *11* находятся в контакте до полного затормаживания. После этого боек *8* и шпиндель-наковальня *11* расцепляются, и описанный процесс периодически повторяется.

В момент первого перемещения бойка *8* он своей конической поверхностью воздействует на кулачок *4*, который замыкает нормально разомкнутый контакт *5*, подавая электрическое питание в цепь счетчика импульсов *СИ* и реле *Р*. При ударе бойка *8* о шпиндель-наковальню *11* поворачивается шпиндель *27*, затягивая резьбовую деталь. Одновременно мультипликатор *26* через взаимодействие водила *14* со штырями *15* и шестерни *16* с неподвижным колесом *17*, шестерни *18* с колесом *29* через стержни *19* поворачивает модуляционный диск *33*, *32*. При повороте модуляционного диска контактами *22* и *25* через контактные штыри *30* происходит замыкание электрической цепи питания. Счетчик импульсов *СИ* отсчитывает первый импульс. При многократном взаимодействии бойка *8* со шпинделем-наковальней *11* набирается требуемое количество импульсов, соответствующих требуемому углу затяжки резьбовых соединений. Срабатывает реле *Р*, отключая двигатель *1*. Для приведения системы измерения угла в исходное положение оператор нажимает кнопку *6*.

Дадим оценку влияния различных факторов на точность затяжки резьбовых соединений ручными одношпиндельными гайковертами ударного действия.

На этапе предварительной затяжки, т.е. до первого удара бойка о наковальню, когда ударный гайковерт работает по аналогии с гайковертом прямого действия, погрешности осевых сил затяжки возникают от следующих факторов:

• нестабильности угловых скоростей вращения выходного вала привода и соответственно шпинделя гайковерта $\delta Q_{\omega}^{\text{пр}}$;

• нестабильности крутящего момента на валу привода и соответственно шпинделя $\delta Q_{\text{м}}^{\text{пр}}$;

• кинематической погрешности в передаточном механизме гайковерта $\delta Q_{\text{к}}^{\text{пр}}$;

• нестабильности моментов сопротивления в резьбовых соединениях $\delta Q_{\text{р}}^{\text{пр}}$;

• неточности настройки пружины *7* на момент предварительной затяжки, т.е. до появления первого удара кулачков бойка *8* о кулачки наковальни *11* – $\delta Q_{\text{пр}}^{\text{пр}}$;

• влияния приведенных моментов инерции вращающихся элементов механизма гайковерта к оси шпинделя $\delta Q_{I}^{\text{пр}}$.

Суммарная погрешность осевых сил предварительной затяжки резьбовых соединений

$$\sigma Q^{\text{пр}} = \sqrt{\delta Q_{\omega}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{м}}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{к}}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{р}}^{\text{пр}^2}} + \\ + \delta Q_{\text{пр}}^{\text{пр}} + \delta Q_{I}^{\text{пр}}. \quad (1)$$

На этапе окончательной (ударной) затяжки резьбовых соединений возникают погрешности осевых сил от следующих факторов:

• нестабильности параметров резьбовых деталей $\delta Q_{\text{р. д}}^{\text{о}}$;

• нестабильности угловых скоростей вращения шпинделя $\delta Q_{\omega}^{\text{о}}$;

• нестабильности моментов сопротивления в передаточных механизмах гайковерта $\delta Q_{\text{м.с}}^{\text{о}}$;

• кинематических погрешностей в передаточных механизмах $\delta Q_{\text{к}}^{\text{о}}$;

• погрешности измерения угла поворота резьбовой детали электромеханической системой контроля $\delta Q_{\text{из}}^{\text{о}}$;

• неточности настройки гайковерта на требуемое значение осевой силы затяжки $\delta Q_{\text{н}}^{\text{о}}$;

• величины приведенных моментов инерции вращающихся элементов механизма гайковерта к оси шпинделя $\delta Q_{I}^{\text{о}}$.

Суммарная погрешность осевых сил на этапе окончательной затяжки

$$\delta Q^{\text{о}} = \sqrt{\delta Q_{\text{р. д}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\omega}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{м.с}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{к}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{из}}^{\text{о}^2}} + \\ + \delta Q_{\text{н}}^{\text{о}} + \delta Q_{I}^{\text{о}}. \quad (2)$$

Анализ оценки значимости погрешностей осевых сил на этапах предварительной и окончательной затяжки показал, что ощутимое влияние на суммарную погрешность сборки резьбовых соединений одношпиндельными ударными гайковертами повышенной точности оказывают погрешности, входящие в правую часть следующей формулы:

$$\delta Q_{\Sigma} = \sqrt{\delta Q_{\text{р}}^{\text{пр}^2} + \delta Q_{\text{р. д}}^{\text{о}^2} + \delta Q_{\text{из}}^{\text{о}^2}} + \delta Q_{\text{н}}^{\text{пр}} + \delta Q_{\text{н}}^{\text{о}}. \quad (3)$$

Расчетные значения погрешностей осевых сил затяжки резьбовых соединений ручными одношпиндельными ударными гайковертами повышенной точности, подтвержденные экспериментально, в зависимости от моментов предварительной затяжки составляют:

- при $Q_{\text{пр}}$ = 1,84 кН – $\delta Q_{\Sigma} \approx 3{,}5$ %;
- при $Q_{\text{пр}}$ = 2,76 кН – $\delta Q_{\Sigma} \approx 3{,}6$ %;
- при $Q_{\text{пр}}$ = 3,68 кН – $\delta Q_{\Sigma} \approx 3{,}7$ %.

Введение электромеханической системы контроля осевых сил затяжки позволило в существующих образцах ручных одношпиндельных гайковертов ударного действия повысить точность затяжки резьбовых соединений не менее чем в 6,5 раза.

Библиографический список

1. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросова Ю.Н.** Способ повышения точности моментов затяжки при сборке резьбовых соединений одношпиндельными гайковертами ударного действия // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 9.

2. **Патент 2321485 РФ.** Ударный гайковерт / В.В. Устинов. Опубл. 10.04.2008.

УДК 621.791.048

В.В. Карабанов, *канд. техн. наук,* **И.О. Бохоров,** *инженер*
Тел. 8-498-520-34-72

Влияние внешних воздействий на процесс пайки

Приведены различные способы внешнего воздействия на жидкую прослойку припоя в паяемом стыке и результаты этих воздействий, показывающих их положительное влияние на структуру и свойства паяных соединений.

Various ways of external influence on a liquid layer of solder in a soldered joint and results of these influences showing their positive influence on structure and properties паяных of connections are resulted.

Ключевые слова: давление, вибрация, ультразвук, магнитное поле, электромагнитное перемешивание жидкого припоя.

Keywords: pressure, vibration, ultrasound, a magnetic field, electromagnetic hashing of liquid solder.

Процесс естественного формирования паяного соединения не всегда обеспечивает ему необходимые качество и свойства. Повышения эффективности процесса пайки достигают путем использования внешних воздействий на область формирования паяного шва. Простейшим является силовое воздействие, при которым прослойка припоя между паяемыми поверхностями находится под определенным давлением во время пайки. Величина давления является важнейшим параметром процесса пайки на различных стадиях его проведения.

Внешнее давление на прослойку припоя осуществляется с различными целями:

- для удержания припоя в вертикальном зазоре;
- подавления процесса образования несплошностей, пор и кристаллизационных трещин в шве;
- предупреждения образования усадочных явлений;
- принудительного заполнения расплавом припоя паяльного зазора;
- выдавливания жидкой фазы из зазора;
- снижения остаточных деформаций в паяном соединении и т.д.

В последнее время пайку начали широко применять при монтаже крупных промышленных металлоконструкций – трубопроводов, при сборке которых заготовку припоя зажимают между паяемыми поверхностями, что гарантирует качественное формирование паяного шва и снижает степень влияния атмосферы на область стыка при пайке в полевых условиях. В процессе плавления припоя, по мере уменьшения его вязкости под действием давления, происходит уплотнение паяльного зазора до величины, при которой внешнее давление уравновешивается гидросопротивлением жидкой прослойки припоя. Величина самопроизвольно образуемого паяльного зазора зависит от вязкости расплава припоя и давления на прослойку. При этом вносимый в стык припой должен иметь широкий температурный интервал плавления, в пределах которого происходит плавное изменение вязкости припоя и постепенное сближение паяемых поверхностей. При этих условиях можно определить допускаемые перепады температуры при нагреве изделия, в пределах которых изменение вязкости припоя незначительно и не влияет на сближение поверхностей [5].

В случае использования припоев с небольшим интервалом плавления или без него расплав припоя, образующийся на отдельных участках, при возникновении перепада температуры и, как следствие, при неодновременности расплавления, может вытекать из сохраняющегося широкого сборочного зазора.

Давление сжатия является важным параметром индукционной пайки промышленных трубопроводов, с V-образной и косостыковой разделками, между которыми вносится прессованное кольцо из порошкового припоя марки П-87, обладающего широким температурным интервалом плавления. При температуре, на 30...40 °С превышающей температуру плавления припоя, толщина жидкой прослойки припоя устанавливалась в пределах 0,3...0,4 мм, которая удерживалась в широком диапазоне давлений – 20...200 МПа.

В указанных условиях пайки важное значение приобретает соблюдение установленного температурного режима. Более значительный перегрев приводит к резкому снижению вязкости расплава припоя, паяемые разделки продолжают сближаться до образования контакта, припой вытекает из зазора, в котором образуются пустоты.

Способ с формирующимся в процессе пайки зазором позволяет отказаться от традиционно установленной жесткой зависимости процесса пайки от уз-

ких капиллярных зазоров, ограничивающей развитие и область применения пайки.

Наиболее распространенными дефектами структуры паяных швов являются газовые поры, раковины, кристаллизационные трещины, снижающие механические и технологические свойства швов. Источниками газовых пор в паяных швах являются газы, адсорбированные поверхностью деталей и растворенные в паяемом металле и припое, а также газовые полости, образовавшиеся в результате неравномерного заполнения расплавленным припоем соединительного зазора. Большую долю в общем объеме пор составляют газы, адсорбированные с поверхности паяемого металла и припоя. Геометрия паяного шва такова, что удаление газовых пузырьков из узкого соединительного зазора затруднена. Поэтому пористость в паяных швах нередко достигает нескольких десятков процентов, особенно в соединениях с большой площадью спая.

Под действием внешнего давления объем газовых пор уменьшается обратно пропорционально этому давлению, увеличивается растворимость водорода в металле, что также способствует уменьшению объема газовых пор. При повышении давления над кристаллизующимся металлом шва устраняются не только газовая, но и усадочная пористость, мелкие кристаллизационные трещины, а также замкнутые непропаи, которые достаточно распространены в паяных швах с развитой площадью контакта [17].

Процесс пайки с кристаллизацией припоя под давлением проводят в замкнутом объеме – герметичном контейнере или в вакуумной печи. Давление в контейнере создают путем заполнения его инертным газом или азотом. Давление в камере печи создают через дренажный клапан, к которому подсоединяется баллон с аргоном. Кристаллизацию металла шва при повышенном газовом давлении можно проводить как в сочетании с предварительным вакуумированием расплавленного припоя, так и без него. После того как расплавленный припой заполнит соединительный зазор, производят повышение газового давления. Практически это делают перед окончанием выдержки температуры пайки. Кристаллизацию металла проводят под давлением 10...30 МПа, исходя из возможностей оборудования и учитывая конструктивные особенности изделия. При нагреве в вакууме в большинстве случаев кристаллизацию проводят при давлениях 10...20 МПа. Учитывая воздействие давления на контейнер, предпочтительным является процесс пайки с нагревом в вакууме и кристаллизацией под давлением, близким к атмосферному. Метод применим с использованием припоев как с температурным интервалом плавления, так и без него.

Кристаллизация металла шва, спаянного под давлением, приводит к повышению механических свойств паяных соединений. Относительное упрочнение паяных образцов составляет для припоев ВПр-4-8 – 10 %, ПМ17А – 15...20 %, Г70НХ – 20...30 %. В изломах паяных швов, выполненных в вакууме, пористость встречается значительно чаще и в большем объеме, чем при кристаллизации под давлением. Кристаллизация под давлением повышает статическую выносливость на 20...30 % [7].

Применение метода кристаллизации под давлением в процессе пайки рекомендуется, если плотность металла шва имеет важное значение для обеспечения работоспособности изделия, при капиллярной пайке с протяженными капиллярами, когда для улучшения заполняемости расплавленным припоем соединительных зазоров повышают температуру пайки и т.д.

При изготовлении изделий, воспринимающих при эксплуатации интенсивные тепловые потоки, ведущим показателем является теплопроводность паяного шва, которая зависит от его дефектности – сплошности. В местах непропая шва он перегревается, что приводит к ухудшению его электрических и механических свойств, понижению коррозионной стойкости. Устранение дефектов в паяных швах с помощью метода кристаллизации под давлением позволяет повысить термостойкость соединений. Метод целесообразно применять при изготовлении вакуумно-плотных паяных соединений. Использование этого метода позволяет также значительно улучшить электрические характеристики паяных электроконтактов за счет повышения плотности металла шва.

Использование высоких давлений на кристаллизующийся расплав припоя позволяет управлять структурой и свойствами паяного шва [12]. Проведенные в ИЭС им. Е.О. Патона исследования по влиянию давления на свойства торцевых паяных соединений труб показали, что их прочность на разрыв и угол загиба (пластичность) повышаются с увеличением степени пластической деформации в плоскости шва при температуре пайки и достигают максимального значения при деформации не менее 40 % толщины соединяемой детали (рис. 1). Такая деформация необходима для получения равнопрочности соединения и тела труб и равнозначной пластичности, т.е. угла загиба, равного 180°.

Эксперименты показали, что если при капиллярной пайке (без воздействия давления) стальных трубчатых торцевых соединений припоем марки ПАН-3 (на медной основе) обеспечивается прочность в пределах 250...350 МПа, то при пайке под давлением прочность аналогичных соединений достигает 700 МПа. Такие закономерности получены при пайке сталей 20, 36Г2С, 12Х1МФ.

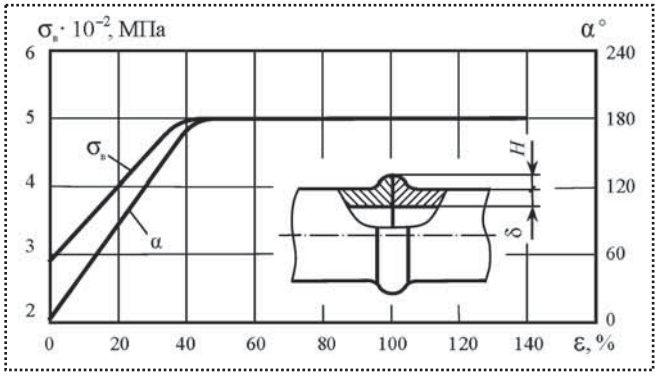


Рис. 1. Изменение прочности $\sigma_в$ и угла изгиба α паяных соединений в зависимости от степени пластической деформации ε в плоскости стыка ($\varepsilon = H/\delta \cdot 100$, %)

Процесс пайки при указанном давлении состоит из двух последовательных операций: нагрев соединительных кромок труб до температуры пайки – 1000 °С и приложение давления на стык при отключенном источнике нагрева.

При нагреве, до приложения давления, жидкий припой интенсивно растворяет сталь. Припой обогащается железом настолько значительно, что оно становится основной составляющей еще жидкого металла шва. При охлаждении на соединяемых кромках в первую очередь кристаллизуется железо, содержащее в твердом растворе элементы припоя – марганец, никель, кремний и даже медь. При 1000 °С растворимость меди в железе достигает 4...6 %. К середине шва оттесняется более легкоплавкая составляющая припоя, обогащенная медью и особенно марганцем.

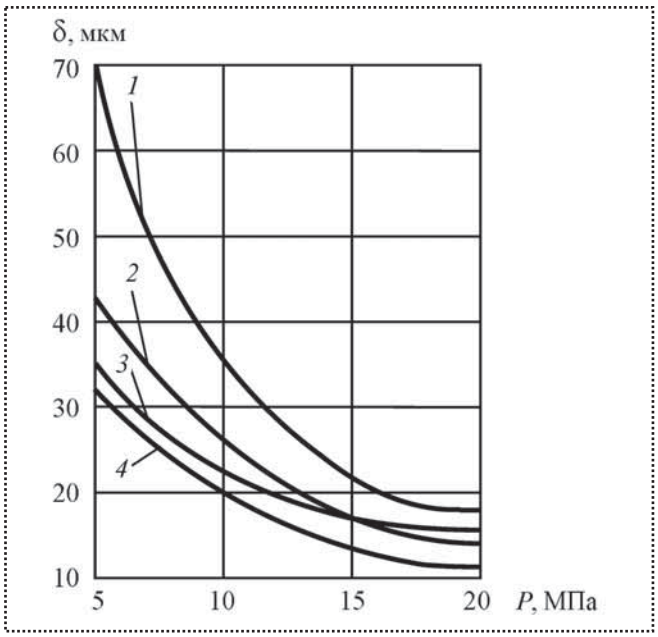


Рис. 2. Зависимость толщины прослойки жидкого припоя в стыке от давления сжатия для сплава ЭП99 при различных температурах:
1, *2* – припой ВПр-7; *3*, *4* – припой ВПр-11; *1*, *4* – T = = 1150 °С; *2* – T = 1200 °С; *3* – T = 1150 °С. Время выдержки – 6 мин

С увеличением давления уменьшается толщина шва (рис. 2) и изменяется его состав. С увеличением степени пластической деформации в шве повышается концентрация железа и снижается содержание входящих в состав припоя элементов меди, марганца, никеля и кремния. Это происходит вследствие выдавливания из зазора легкоплавких составляющих припоя и интенсификации диффузионных процессов при пластической деформации [12].

Течение металла вдоль границы раздела увлекает за собой расплавленный припой и флюс с остатками оксидных пленок и загрязнений.

Осуществляя изотермическую выдержку, можно получать равнопрочное с паяемым металлом соединение вследствие "рассасывания" оставшихся прослоек припоя.

Уменьшение толщины жидкой прослойки припоя при пайке с высоким давлением происходит до определенного предела – 3...5 мкм, при степенях пластической деформации – свыше 5 %. При дальнейшем повышении давления толщина прослойки остается неизменной. Такая ограниченность процесса вытеснения жидкой прослойки из уменьшаемого зазора объясняется тем, что при очень малых зазорах металлический расплав приобретает особые свойства, близкие к свойствам твердых тел, поэтому полностью выдавить его из зазора путем повышения давления невозможно. С повышением давления повышается температура плавления расплава, поэтому даже при температуре пайки может наступить кристаллизация оставшегося припоя. При этом требуется минимальное время обогащения тонкой прослойки медного припоя железом до равновесного состояния. Так при пайке стальных стержней припоем ПАН-3, при толщине его слоя 0,05 мм, равновесное насыщение слоя железом происходит через 0,1 с.

Наряду со сращиванием отдельных соприкасаемых участков паяемых поверхностей происходит сращивание кристаллов твердого раствора на основе железа, выпавших на паяемых поверхностях до приложения давления, что повышает прочность соединения [8]. Формирование паяного шва продолжается и в твердом состоянии, свойства его улучшаются, вследствие протекания тех же процессов, как при термомеханической обработке.

В институте электросварки им. Е.О. Патона разработано оборудование и технология для диффузионной сваркопайки биметаллических труб и тел враще-

ния сложной формы из различных металлов и сплавов под внутренним гидростатическим давлением. Технологический процесс заключается в нагреве в среде аргона двухслойной заготовки с прокладкой припоя между ними, под внутренним давлением 12 МПа. Температура пайки – до 1200 °С. Диффузионное соединение слоев обеспечивается в процессе выдержки этой температуры. В процессе нагрева под давлением слои поджимаются друг к другу, избыточное количество припоя выдавливается и происходит формирование биметаллического соединения с минимальной толщиной паяного шва. При этом процессе геометрические размеры труб не изменяются. Биметаллические трубы можно подвергать всем видам деформирования без нарушения сплошности паяного соединения. На предприятии "Ждановтяжмаш" производилось изготовление и совершенствование выпускаемых установок [9].

Пайку с высоким давлением используют не только в качестве самостоятельного технологического процесса соединения деталей, но и в качестве промежуточной стадии формирования соединения деталей из жаропрочных сталей при диффузионной сварке, для которой требуется особенно тщательная подготовка поверхностей и применение высоких давлений с применением сложного и дорогостоящего оборудования. При сварке тонкостенных конструкций требуется нагрев и изделия, и приспособления для сжатия деталей. С целью упрощения технологии диффузионной сварки применяют расплавляющиеся прослойки – припои, которые в первую очередь выполняют роль радикального средства по удалению оксидных пленок и активизируют соединяемые поверхности. Жидкий припой способствует отделению, диспергации и растворению оксидных пленок. Активирующее действие прослойки усиливается, если она содержит в небольших количествах элементы, способные восстанавливать или переводить оксиды в легкоплавкие соединения. Такими элементами могут быть углерод, бор, щелочные элементы [7].

Смачивая паяемые поверхности, жидкий припой может растворять и сглаживать микронеровности, что позволяет снизить требования к чистоте механической обработки поверхностей.

После завершения процесса взаимодействия жидкой прослойки припоя с соединяемыми поверхностями она становится нежелательной при диффузионной сварке и выдавливается из стыка. Идеальным условием было бы ее полное удаление, так как по механическим свойствам она значительно уступает металлу изделия. Поэтому второй стадией диффузионной сварки является растворение оставшейся прослойки припоя, чему способствуют диффузионные процессы. Чем тоньше прослойка, тем быстрее пройдут процессы ее растворения. Время растворения прослойки до заданной концентрации элемента растет пропорционально квадрату начальной концентрации и толщины.

В качестве расплавляемых и выдавливаемых прослоек могут применяться припои ВПр-7, ВПр-11, ВПр-11-40Н, а также двойные никелевые сплавы с марганцем, кремнием, бором и др. Сплавы могут содержать добавочные элементы, активизирующие процесс и снижающие температуру плавления прослойки.

Высокие механические свойства соединений жаропрочных сплавов получаются при использовании расплавляющихся прослоек, содержащих бор. Удаление прослоек при сжатии обеспечивает высокую гомогенность металла в зоне соединения непосредственно после сварки в течение нескольких минут. Последующая, даже кратковременная, термическая обработка приводит, практически, к полному выравниванию химического состава металла в зоне соединения.

Эффективным средством значительного повышения качества паяного шва является вибрационная обработка паяемых изделий [14]. Основная цель обработки направлена на снижение химической и структурной неоднородности при кристаллизации шва (особенно широкого зазора), а также микронеоднородности в объеме каждого кристалла шва.

Существует два рациональных метода наложения упругих колебаний – создание вибраций с низкой частотой – до 200 Гц (низкочастотная вибрация) и ультразвуковой вибрации – с частотой не менее 20 кГц.

При вибрации в металле образуются мощные ударные волны, которые разрушают фронт кристаллизации и создают дополнительные центры кристаллизации в жидком припое. В результате создаются условия для переохлаждения расплава, при котором увеличиваются скорости зарождения центров кристаллизации перед границей затвердевания. При вибрационном воздействии снижаются вязкость и межфазное поверхностное натяжение расплава, что облегчает перемещение атомов жидкости в твердую фазу при формировании центров кристаллизации [4].

К повышению прочности паяного шва и к улучшению его структуры приводит применение в процессе пайки низкочастотных вибраций. При минимальных зазорах (0,02...0,05 мм) прочность соединений возрастает с повышением частоты вибраций (до 100 Гц) и может достигнуть 30...40 %. При зазорах свыше 0,08 мм прочность паяных соединений возрастает с повышением частоты от 50 до 300 Гц (рис. 3).

Микроструктура соединений, паяных без вибраций в указанных зазорах, имеет резко выраженную ликвацию, которая влияет на прочность шва. При пайке с вибрацией происходит не только раздробление и равномерное распределение хрупкой фазы ин-

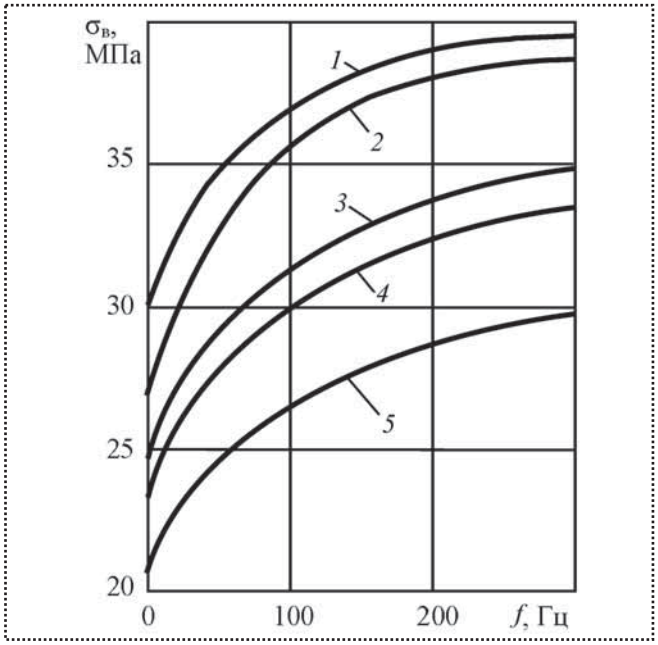


Рис. 3. Зависимость временного сопротивления ($\sigma_в$) стали 08Х18Н10Т, паяных припоем Г40ХН в зависимости от частоты вибрации (*f*) и величины зазора:
1 – 0,05 мм; *2* – 0,08 мм; *3* – 0,1 мм; *4* – 0,16 мм; *5* – 0,2 мм

терметаллидов в шве, но и упрочнение границ зерен паяемого металла, которые становятся более тонкими, более чистыми, что способствует повышению прочности шва. На образцах, паяных с применением вибрации, сплошной хрупкой прослойки в центре шва не наблюдается, она рассеяна по объему шва в виде мелкодисперсных включений, которые не только не снижают прочность паяных соединений, но даже упрочняют их [14].

При более широких зазорах в паяных без вибрации швах наблюдаются крупные игольчатые интерметаллиды с высокой твердостью, расположенные по границам зерен, что снижает прочность и приводит к возрастанию хрупкости шва. При использовании вибрации наблюдаются только отдельные диспергированные участки, не влияющие на прочность шва.

При высокотемпературной капиллярной пайке композитным припоем 5НА, не требующим применения флюса, телескопических соединений трубопроводов из нержавеющей стали диаметрами 8...12 мм, осуществляют приложение вибрационных воздействий на одну трубу в осевом направлении, на другую – в радиальном (рис. 4). Такой характер вибраций улучшает условия затекания припоя в зазор между трубами и исключает образование непропаев при неравномерном зазоре. Припой в виде жесткого кольца устанавливают на конец охватываемой трубы. Пайку проводят в среде проточного аргона при температуре 1150...1250 °С. Время пайки 10...15 с [15].

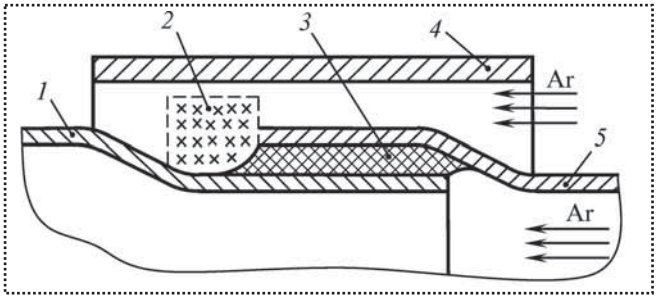


Рис. 4. Схема пайки стыка трубопровода в аргоне с вибрацией:
1 – охватываемая труба; *2* – припой; *3* – расплав припоя: *4* – нагреватель; *5* – охватывающая труба

При низкотемпературной пайке печатных плат вибрация в припое позволяет ускорить разрушение оксидных пленок и удаление их из зоны пайки.

При проведении различных металлургических процессов широко применяют ультразвуковые колебания [10]. При сварке ультразвуковые колебания обеспечивают улучшение структуры шва, при плавке – гомогенизацию состава сплава. При пайке применение ультразвуковых колебаний также способствует улучшению структуры паяного шва и его свойств [1].

Схема индукционной пайки в вакууме ($1{,}33 \cdot 10^2$ Па) и в формогазе телескопического соединения, состоящего из основания *5* и трубы *2*, представлена на рис. 5. Припой *3* укладывается над паяльным зазором, нагрев

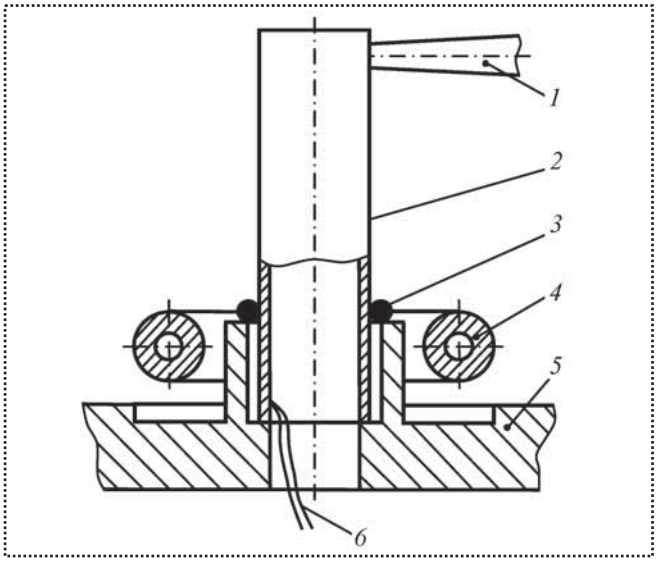


Рис. 5. Схема индукционной пайки в вакууме и в формогазе телескопического соединения с использованием ультразвуковых колебаний:
1 – акустический волновод; *2* – труба; *3* – припой; *4* – индуктор; *5* – основание; *6* – термопара

осуществляется с помощью индуктора *4*. Температура нагрева контролируется термопарой *6*. Ультразвуковые колебания подводятся к трубе *2* жестко закрепленным акустическим волноводом *1*. Колебания с частотой 44 кГц и амплитудой 1...3 мкм создавались в трубе в момент плавления припоя на медной основе.

Изучение процесса пайки в указанных условиях показало, что ультразвуковые колебания способствуют разрушению оксидных пленок, снижают вязкость припоя, улучшают процессы смачивания и капиллярного течения, активизируют процесс сближения атомов на атомные расстояния [11]. Наносимые перед пайкой на нержавеющие стали никелевые покрытия могут быть в два раза тоньше. При наложении ультразвуковых колебаний создается дополнительное капиллярное давление, что способствует заполняемости "глухих" капилляров с блокированным в них формогазом.

Вакуумная надежность таких соединений в 1,5–2 раза выше, чем в соединениях, паяных без использования ультразвуковых колебаний.

Ультразвуковая технология является универсальным процессом металлизации и пайки, которая может быть применена к материалам с различной физико-химической природой – алюминию, титану, медным сплавам, сталям.

Возникающие в кавитационной области микро- и макропотоки жидкого припоя уносят частицы оксидов и загрязнений от поверхности твердого металла, перемешивают расплав и ускоряют процессы лужения и пайки. Интенсивное движение расплава припоя увеличивает кинетическую энергию диффундирующих атомов, создавая их микропотоки.

Ультразвуковые колебания активизируют растворный процесс на границе спая. Толщина диффузионного слоя зависит от интенсивности перемешивания расплава вблизи твердой поверхности. Уменьшение толщины диффузионного слоя приводит к соответственному уменьшению градиента концентрации на поверхности раздела фаз, что ускоряет диффузионный процесс. Растворимость паяного металла в расплаве припоя возрастает при содержании в нем частиц абразивного материала или первичных кристаллов припоя, при этом кавитационный процесс может возникать и при допороговых интенсивностях ультразвуковых колебаний.

Особенно широкое применение ультразвуковые колебания находят при низкотемпературной пайке и лужении с применением ультразвуковых паяльников и специальных ультразвуковых ванн.

Активное воздействие на процесс формирования паяного соединения оказывают магнитные и электромагнитные поля [4].

Общеизвестно, что одним из способов повышения механических свойств швов, особенно при пайке легкоплавкими припоями, является их армирование частицами тугоплавкого металла. Однако их беспорядочное расположение по объему шва без прочной связи с паяемыми поверхностями не может существенно изменить свойства паяного соединения. К существенному повышению механических свойств приводит упорядочение структуры и положения тугоплавких кристаллов или дендритов в паяном шве. Регулирование структуры паяного шва возможно путем соответствующего теплоотвода от паяемого соединения при кристаллизации прослойки припоя или путем создания диффузионного потока углерода между паяемыми поверхностями разнородных металлов. Если возникающие при кристаллизации припоев кристаллы или дендриты магнитовосприимчивы, т.е. если их точка Кюри выше температуры пайки, то применяют магнитное поле, пронизывающее прослойку припоя в поперечном шву направлении [13].

Если при 700...800 °С приготовить расплав припоя системы никель–свинец с содержанием никеля до 5 %, то при его кристаллизации (325 °С) вследствие ограниченной растворимости никеля в твердом свинце (0,46 %) будут выделяться кристаллы, точка Кюри у которых равна 350 °С, что позволяет управлять их положением в расплаве с использованием магнитного поля.

Технология пайки в магнитном поле состоит в следующем. Подготовленные паяемые поверхности соединяемых деталей погружают в жидкий припой, находящийся в магнитном поле, направленном перпендикулярно паяемым поверхностям. Затем систему охлаждают ниже точки Кюри, но выше температуры затвердевания припоя и вынимают детали из расплава. При такой технологии лужения кристаллизация тугоплавкой фазы припоя начинается с паяемой поверхности и выпадающие из раствора кристаллы ферромагнитного материала смещаются магнитным полем из глубины расплава к паяемой поверхности детали, что приводит к образованию на ней слоя дендритов тугоплавкой фазы. Кристаллы, выпавшие из расплава, скапливаются в участках, где напряженность магнитного поля выше, что приводит к перераспределению ферромагнитной фазы. Структура слоя характеризуется дендритами на никелевой основе, которые растут от поверхности детали и пронизывают слой припоя на определенную глубину.

Затем залуженные детали нагревают на 10...15 °С выше температуры плавления, но ниже точки Кюри в магнитном поле, перпендикулярном соединяемым поверхностям. Детали сжимают с усилием до 20 МПа в течение 20...30 мин и охлаждают до затвердевания. Дендриты, встречаясь в средней части прослойки припоя, переплетаются ответвлениями и сращивают-

ся, что приводит к повышению механических свойств паяных соединений.

Размеры дендритов, их плотность и ориентация регулируются скоростью охлаждения, температурой плавления припоя, значением и конфигурацией магнитного поля.

Магнитное поле увеличивает скорость растекания расплава припоя по металлической поверхности, а следовательно, усиливает капиллярные процессы при пайке. Оно также повышает коэффициент диффузии компонентов на границе контакта металлов при контактно-реактивной пайке, вследствие чего повышается скорость процесса. При контактно-реактивной пайке цилиндрических образцов висмут–олово и висмут–кадмий скорость процесса в магнитном поле в 5000 эрстед увеличивается в 1,3–1,5 раза.

Использование магнитного поля может решить основную проблему некапиллярной пайки – удерживать расплав припоя в широком (некапиллярном) паяльном зазоре. С этой целью в ИЭС им. Е.О. Патона разработан способ "магнитной" пайки, применяемый при соединении трубопроводных сантехнических систем [2].

При этом способе широкий зазор между концами труб при их сборке заполняется пастой, содержащей смесь порошков припоя и тугоплавкого (неплавящегося) наполнителя, точка Кюри которого превышает температуру пайки. На соединяемые концы труб устанавливаются постоянные или электрические магниты, создающие в паяльном зазоре магнитное поле соответствующей мощности. Производят индукционный или газопламенный, с применением кольцевой горелки, нагрев стыка труб до температуры плавления легкоплавкой составляющей композитного припоя. Благодаря магнитному полю частички наполнителя намагничиваются и равномерно распределяются вдоль магнитных силовых линий. Располагаясь в широких и неравномерных зазорах, они удерживают легкоплавкую расплавленную фазу припоя, не позволяя ей вытечь за пределы паяльного зазора в период пайки.

Вносимая в стык паста содержит 70 % припоя ПАН-3 на медно-марганцевой основе и 30 % наполнителя – сплава меди с кобальтом в соотношении 1:1. К смеси припоя добавляется порошковый флюс на основе буры в количестве 30 % от количества припоя.

Прочность стыковых паяных соединений стабильна при зазорах от 0,5 до 1,5 мм и находится в пределах 80...90 % прочности металла труб. Телескопические соединения, спаянные с величиной нахлестки более двух толщин труб, при испытаниях на статическое растяжение всегда разрывались по металлу труб.

При использовании в качестве наполнителя железного порошка температура пайки должна быть ниже 750 °С. Эффект удержания расплава припоя в больших зазорах тем выше, чем больше разность между точкой Кюри наполнителя и температурой плавления припоя. В ИЭС им. Е.О. Патона разработана "Инструкция по применению магнитной пайки стальных труб" (ВСН 165–80).

Во Владимирском государственном университете разработана технология восстановления "магнитной" пайкой железнодорожных и автоцистерн, крупных емкостей и трубопроводов с применением специально разработанных низкотемпературных припоев на основе оловянно-свинцовых припоев. Разработанная технология позволяет устранить сквозные и несквозные дефекты в стенке сосуда (а. с. 97106647 РФ).

В зазор вводят композитный припой, содержащий ферромагнитный наполнитель и подводят магнит, создающий магнитное поле в изделии с величиной индукции 0,1...0,5 Тл. Способ обеспечивает качественную пайку потолочных швов без вытекания припоя. Применяются гетерогенные композиционные припои МАСМА-108, РИКЦ-1/2 и ПОСКиН-1, содержащие тугоплавкую фазу – железный порошок с чешуйчатой формой частиц [16]. Разработка внедрена в ЗАО "Технокранэнерго" (г. Владимир).

Внешнее магнитное поле может быть эффективно использовано для управления процессами кристаллизации паяного шва и формирования наиболее благоприятной его структуры.

Применяемые в металлургии современные технологии плавки металлов показывают, что использование магнитных, электрических и электромагнитных полей позволяет управлять процессом кристаллизации при затвердевании металлов и получать более качественные металлические структуры, обеспечивающие их высокие механические и технологические свойства. Использование при выплавке металлов и сплавов внешних воздействий на затвердевающий металл является основным современным направлением в развитии металлургического производства [3, 4].

В качестве припоев при высокотемпературной пайке используют сложные сплавы, образующие при кристаллизации разветвленную дендритную структуру. Механические свойства паяного шва в значительной степени зависят от размеров дендритов и развития дендритной неоднородности. Чем меньше размеры дендритов и расстояние между их ветвями, тем меньше дендритная ликвация и выше механические свойства металла. Размеры дендритов определяются, прежде всего, степенью переохлаждения сплава. Наиболее предпочтительной является дендритная форма кристаллов без ветвей второго и третьего порядков, для чего требуется необходимое переохлаждение сплава. С увеличением переохлаждения разветвление кристал-

ла увеличивается, а на границе ветвей дендритов скапливаются примеси и поры. Наложение магнитного поля приводит к уменьшению переохлаждения и препятствует развитию дендритной структуры. Чем больше скорость зарождения центров кристаллизации и чем меньше скорость их роста, тем меньше зерно.

Накладывая магнитное поле, можно уменьшить критический радиус зародыша твердой фазы, повысить кристаллизационное давление и коэффициент диффузии. Такое воздействие магнитного поля объясняется сообщением дополнительной энергии молекулам твердой и жидкой фаз на границе затвердевания, в результате изменяется энергия активации молекул и происходит сдвиг равновесия в системе расплав–кристалл. Кристаллизация происходит при более низких температурах.

Линейная скорость роста и скорость образования зародышей зависит от напряженности магнитного поля и тем больше, чем меньше переохлаждение расплава.

Наложение магнитного поля на расплав припоя снижает поверхностное натяжение и увеличивает его жидкотекучесть.

Практически аналогичным образом влияет на кристаллизующийся металл и электрическое поле. Наложение электрического поля влияет на увеличение скорости кристаллизации, на первичную структуру затвердевающего сплава, ускоряет зародышеобразование и уменьшает степень переохлаждения расплава, влияет на перераспределение примесей.

Наличие электрического заряда на поверхности жидкого металла и на границе с твердым металлом снижает его поверхностное натяжение, увеличивает силы сцепления атомов жидкого металла с твердым, вследствие чего увеличивается смачиваемость расплавом и его жидкотекучесть.

Эффективность процесса пайки возрастает при совместном использовании магнитного и электрического полей, пропускаемых через прослойку припоя в процессе пайки [4], что обеспечивает расширение технологических возможностей, в частности, процесса контактного плавления. Соединяемые заготовки из различных материалов приводят в контакт и осуществляют нагрев до появления жидкой фазы. Затем накладывают на зону расплава постоянное магнитное поле в направлении, параллельном фронту контактного плавления, и постоянное электрическое поле – в направлении, перпендикулярном этому фронту. Электрическое поле создают после образования в области контакта прослойки интерметаллидов (а.с. № 1437172). В процессе контактного плавления проводят, по меньшей мере, однократное изменение величины электрического и магнитного полей. При проведении пайки в конвективном режиме жидкой прослойки скорость контактного плавления увеличивается. При диффузионном режиме повышается эффект управляемости степени воздействия на рост различных твердых фаз. При этом активизируются паяемые поверхности, усиливаются процессы смачивания и растекания образующегося припоя, интенсифицируется электромассоперенос через межфазную границу.

Воздействие электрических, магнитных и электромагнитных полей на затвердевающий металл широко применяются в литейном производстве. Применение и совершенствование процессов магнитной гидродинамики в передовых странах признается приоритетным направлением в развитии металлургического производства. Развитие и совершенствование способов и процессов пайки происходило в неразрывной связи с достижениями в металлургии [6]. Однако в настоящее время приведенные достижения в металлургическом производстве остаются без внимания специалистов паяльного производства, которое основано на использовании естественно протекающих процессов взаимодействия расплава припоя с паяемым металлом. Наглядным примером эффективности применения внешних воздействий на процесс формирования паяного соединения служат разработки процессов пайки с использованием давления.

Общеизвестно, что создаваемое при индукционном нагреве электромагнитное поле оказывает силовое воздействие на жидкий металл, что при индукционной плавке используется для электромагнитного перемешивания жидкого металла [7]. При индукционной пайке изделий с широкими сборочными зазорами такое воздействие приводит к изменению состояния расплава припоя вплоть до его удаления из зазора. Однако в существующей науке по традиционной капиллярной пайке вопросы силового воздействия электромагнитного поля на прослойку припоя не рассматриваются, так как капиллярные силы в узких зазорах надежно удерживают жидкую прослойку припоя в стационарном состоянии.

Из опыта применения процесса электромагнитного перемешивания жидкого металла при плавке и сварке известно, что при этом переносе резко изменяются свойства жидкого и кристаллизирующегося металлов. При перемешивании уменьшается вязкость и повышается жидкотекучесть, снижается напряжение сдвига, расплав очищается от инородных включений – газовых и неметаллических, резко возрастают плотность и однородность металла.

В процессе кристаллизации (охлаждения) расплава при перемешивании происходит дробление и растворение возникающих кристаллов твердой фазы, разрушаются возникающие связи, поэтому частично закристаллизовавшийся расплав продолжает сохранять свойства жидкости до достижения в нем содер-

жания твердой фазы, примерно 50 %. Значительно замедляется рост вязкости расплава, происходит значительное концентрационное переохлаждение. Соответственно сокращается зона неравновесной кристаллизации, уступая место формированию мелкозернистой структуры. В затвердевшем сплаве отсутствуют дефекты усадочного происхождения, что обеспечивает соединению высокие и стабильные механические свойства.

Перемешивание в сочетании с высокой скоростью охлаждения может полностью подавить разделяющую диффузию компонентов в сплаве.

Частота тока, применяемого при плавке и сварке, как правило, небольшая – 1...100 Гц. При индукционной пайке частота тока несоизмеримо выше – 1...70 кГц, а высокая скорость нагрева достигается за счет применения высокочастотного источника большой мощности. Сравнительно узкие зазоры при пайке создают условия для ориентированного движения расплава, а большая площадь контакта с паяемым металлом способствует быстрому насыщению им движущегося расплава припоя. Поэтому даже кратковременный процесс перемешивания расплава припоя в широком зазоре в пределах, принятых при пайке, может привести к существенному изменению структуры и свойств паяного шва.

В целях определения общих закономерностей взаимодействия расплавов припоев, имеющих различную физико-химическую природу, со сталями проводилась экспериментальная индукционная пайка встык стальных прямоугольных планок сечением 20×50 мм с фиксированными зазорами (в пределах 1...3 мм) с последующим изучением структуры и свойств паяных швов.

В качестве припоев применяли марганец, образующий с железом неограниченные растворы в твердом и жидком состояниях, припой на железномарганцевой основе П-87, содержащий 40 % железа и медь, образующую с железом ограниченный твердый раствор. Порошковые припои вносили в стык при сборке стыков в форме прессованных закладных пластин. Поверхность пластин в месте стыка покрывалась тонким слоем паяльного флюса ПВ-201. Пайка осуществлялась от преобразователя с частотой тока 2,4 кГц. Скорость нагрева составляла 15 °С/с. При пайке производилась выдержка при температурах, на 10 и 50...60 °С превышающих температуру плавления используемого припоя. В качестве фиксаторов использовались проволочные вставки соответствующего диаметра.

Результаты химических исследований паяных швов, представленные в таблице, показывают, что во всех случаях отмечается значительное и равномерное насыщение всей зоны сплавления припоя железом вне зависимости от величины паяльного зазора и времени выдержки. При пайке припоем П-87 и марганцем достигнута высокая степень концентрационного переохлаждения припоя.

Особенно высокое насыщение зоны сплавления железом произошло при пайке порошковым марганцем. При температуре пайки, равной 1260 °С, что на 10 °С превышает температуру плавления марганца, содержание железа в шве достигло 56 %, а при 1350 °С – 71 %. Следовательно, с повышением температуры пайки, т.е. с повышением удельной мощности нагрева содержание железа в зоне сплавления возрастает, однако величина концентрационного переохлаждения, определяемая по двойной диаграмме состояния сплавов марганец–железо, практически сохраняется. Такая закономерность может быть объяснима увеличением степени подвижности расплава при увеличении удельной мощности нагрева, при котором растворение паяемого металла в расплаве припоя должно происходить по кинематическому механизму с коллективным переходом его атомов или атомов переходного слоя в конвективный поток с последующим переносом их в объем расплава.

Движение расплава препятствует зарождению устойчивых центров кристаллизации и росту зарождающихся кристаллов, достигаются значительное концентрационное переохлаждение и равномерное распределение железа по шву. Электромагнитное перемешивание приводит к диспергированию зарождающихся твердых кристаллов и к измельчению зерен паяного шва.

Интенсивное насыщение припоя П-87 железом достигается только при перегреве на 50...60 °С выше температуры плавления припоя. Величина концентрационного переохлаждения достигает 80...100 °С, что обеспечивает быструю кристаллизацию припоя после прекращения нагрева.

Для определения величины концентрационного переохлаждения использовали тройную диаграмму состояния медно-никелево-марганцевого сплавов, в которой, учитывая химическое и физическое сродство никеля и железа, в вершине треугольной диаграммы, обозначающей содержание никеля, принимали суммарное содержание никеля и железа.

При нагреве до температуры, на 10...15 °С превышающей температуру плавления припоя, по зоне сплавления отмечается нестабильное повышение содержания железа по сравнению с содержанием в исходном припое (см. таблицу). Такой характер насыщения припоя железом можно объяснить высокой вязкостью расплава сложного состава, невысокой интенсивностью процесса перемешивания.

Из таблицы также следует, что предельное насыщение указанных припоев при перегреве на 50...60 °С

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

Припой	Температура пайки, °С	Мощность нагрева, кВт	Выдержка, с	Паяльный зазор, мм	Среднее содержание Fe, %	Временное сопротивление разрыву, МПа	Концентрационное переохлаждение, °С
Марганец	1260	30	30	1	56	420	100
	1260	30	30	2	54	460	100
	1260	30	30	3	50	410	85
	1260	30	60	2	55	430	100
	1260	30	60	3	53	420	96
	1350	38	60	2	73	550	100
П-87	1145	18	30	1	41	390	–
	1145	18	–	2	40	390	–
	1145	18	30	2	43	390	–
	1145	18	60	2	51	460	–
	1145	18	30	3	47	440	–
	1200	23	30	2	60	560	80
	1200	23	60	2	71	580	100
Медь	1090	15	30	1	3,3	450	–
	1090	15	30	2	2,3	440	–
	1090	15	30	3	2,3	460	–
	1090	15	60	1	3,2	470	–
	1090	15	60	2	2,3	480	–
	1090	15	60	3	3,4	420	–

достигается при минимальной выдержке температуры (в течение 30 с) и дальнейшее увеличение ее продолжительности к существенному изменению состава расплава не приводит. В течение указанной выдержки наступает динамическое равновесие в диффузионных потоках на границе между движущимся расплавом и паяемым металлом.

Микрорентгеноспектральный анализ паяных швов показывает, что в швах, паянных марганцем, отмечается более высокая равномерность распределения железа по ширине шва (рис. 6), чем в швах, паянных припоем П-87, для которых характерны значительные колебания в содержании железа между отдельными структурными составляющими. При пайке с более высоким перегревом эти колебания уменьшаются, что свидетельствует об измельчении структуры шва и повышении содержания железа в междендритной фазе. Структура швов, паянных марганцем, отличается плотным расположением равноосных дендритов (рис. 7), переходный слой незначителен по сравнению со швом, паянным припоем П-87, размеры переходного слоя и дендритов в которых существенно крупнее. На различие в структуре швов оказывает существенное влияние скорость снижения вязкости образующегося расплава, которая у расплава марганца, не имеющего температурного интервала плавления, значительно выше.

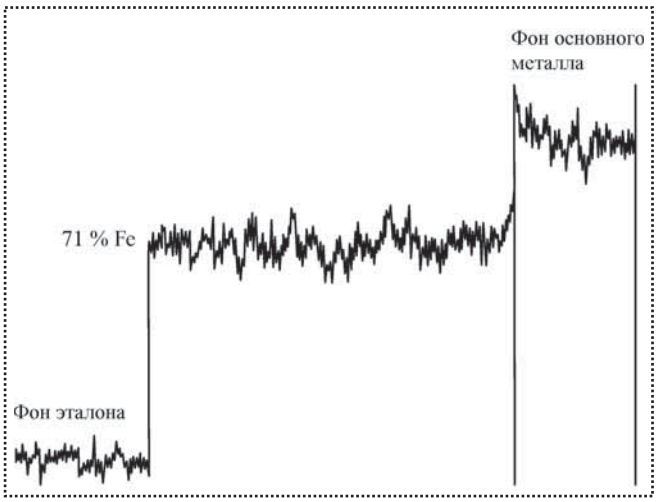


Рис. 6. Распределение железа в шве толщиной 3 мм, паянном марганцем с индукционным нагревом

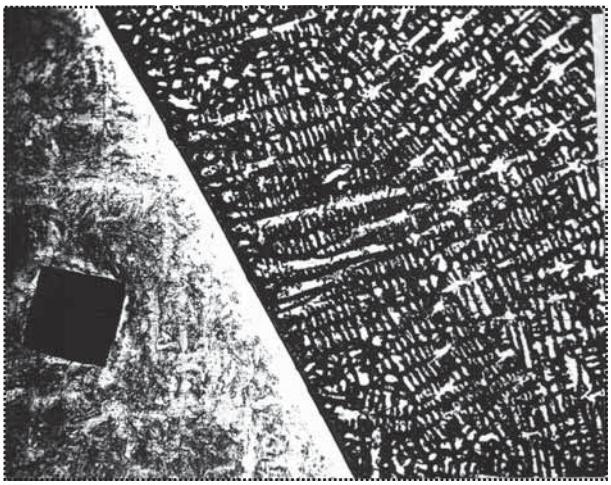


Рис. 7. Структура широкого шва, паянного марганцем (×100)

Особый интерес представляет распределение железа в шве, паянном медью. Если фотокалориметрический анализ металла шва показывает предельную насыщенность его железом, то микрорентгеноспектральный анализ выявил на отдельных участках содержание железа, значительно превышающее его предельную растворимость в меди.

В случае равновесной кристаллизации пересыщенным железом сплав меди должен иметь двухфазную структуру, состоящую из твердых растворов на основе меди и на основе железа. При пайке с внешним источником нагрева медью стальных изделий сплав с таким содержанием железа образуется только на участках, прилегающих к границе спая, где обогащение припоя железом происходит по диффузионному механизму. При этом вторая фаза, содержащая 11 % меди, выделяется на поверхность основного металла в виде прикристаллизованного слоя толщиной 20...30 мкм. При температурах перегрева жидкой меди, превышающей температуру плавления стали (1600...1700 °С) прикристаллизованный слой достигает толщины 0,5 мм и более, что соизмеримо с характером распределения железа в паяном шве при указанных условиях индукционной пайки с температурой пайки 1100 °С. При индукционной пайке достигается тот же эффект изменения состава припоя в паяльном зазоре при температурах на 500...600 °С ниже, чем при указанном перегреве жидкой фазы.

Металлографический анализ показал, что избыточная фаза на основе железа равномерно распределена по всему объему шва в виде мелкодисперсных включений. Среднее содержание железа в зоне сплавления при паяльных зазорах 1...3 мм не изменяется (см. таблицу), однако величина кристаллов избыточной фазы с уменьшением зазора уменьшается. Если процесс кристаллизации протекает быстро, то растворившееся в жидкой меди железо не успевает выделиться из жидкого раствора и остается в нем в виде пересыщенного твердого раствора. В этом случае кристаллов фазы на основе железа в шве не наблюдается. Это очень важная особенность процесса формирования паянного медью шва, так как коррозионная стойкость и другие механические свойства паяного шва зависят от наличия в нем структурно свободного железа или фазы на его основе.

Обращает на себя внимание волнистый рельеф поверхности паяемого металла и следы циркуляции расплава припоя в зазоре. Такая структура паяного шва идентична структуре, наплавленной на стальную поверхность меди. Процесс индукционной пайки, так же как и наплавочный процесс, характеризуется перемешиванием расплава, при котором происходит вымывание – диспергирование блоков и зерен паяемого металла жидкой медью с последующим их растворением в прослойке припоя. Можно полагать, что процесс растворения стали медью в широком зазоре определяется не атомным механизмом гетерогенной диффузии, а динамикой конвективных потоков жидкой меди, температурой и временем контактирования фаз.

Характерной особенностью рассмотренных паяных швов является их высокая плотность, отсутствие в них включений и пор. Конвекция расплава в зазоре приводит к их удалению. Показательным является также отсутствие заметной локальной эрозии и сохранение равномерности паяльных зазоров.

Насыщение расплава припоя тугоплавкими компонентами – железом, никелем – достигается и при внесении в порошковый припой или на поверхность пластинчатого припоя порошкового наполнителя. Проводилась экспериментальная индукционная пайка указанных образцов с применением закладных пластин, прессованных из порошкового припоя П-87 и порошков никеля и железа в массовом соотношении 5:1. При металлографическом анализе паяных швов выявлено, что в случае превышения массового соотношения наполнителя более чем на 20 % часть его останется нерастворенной (рис. 8). Указанное соотношение соответствует количеству растворяемого в припое паяемого металла при пайке без наполнителя. Состав переходного слоя при этом характеризуется меньшим содержанием железа.

Изменение химического состава шва сопровождается изменениями механических свойств паяных соединений. Из таблицы следует, что прочность паяных соединений не зависит от ширины паяльного зазора в указанных пределах, а определяется свойствами сплавов, образующихся в зазоре. На повышение прочности соединений оказывает влияние также высокая плот-

Рис. 8. Частица наполнителя в широком шве, паянного припоем П-87 (×100)

ность припоя в широком шве и его мелкодисперсная структура.

С целью определения возможности практического использования определенного эффекта электромагнитного перемешивания расплава припоя в широком паяльном зазоре проводили экспериментальную пайку указанных ранее образцов с использованием медномарганцевого припоя П-65, образующего ограниченные твердые растворы с железом и имеющего температуру плавления 910 °С, а также с использованием прессованных пластин из смеси порошков меди и никеля с массовым соотношением 5:1. В первом случае температура пайки составляла 950 °С, во втором – 1100 °С, что на 17 °С превышает температуру плавления наиболее легкоплавкого компонента смеси – меди. Паяльный зазор составлял 1 мм, выдержка при температуре пайки – 30 с.

Исследования паяных соединений показали, что при пайке припоем П-65 содержание железа в шве достигает 24...27 %, прочность соединений – 700...740 МПа, что близко к показателям соединений, паянных припоем на железномарганцевой основе – П-87. Во втором случае в шве получен сплав с содержанием железа порядка 7 %. Получившийся сплав близок по составу медноникелевому сплаву с температурой плавления 1180...1190 °С. Концентрационное переохлаждение сплава составило порядка 100 °С.

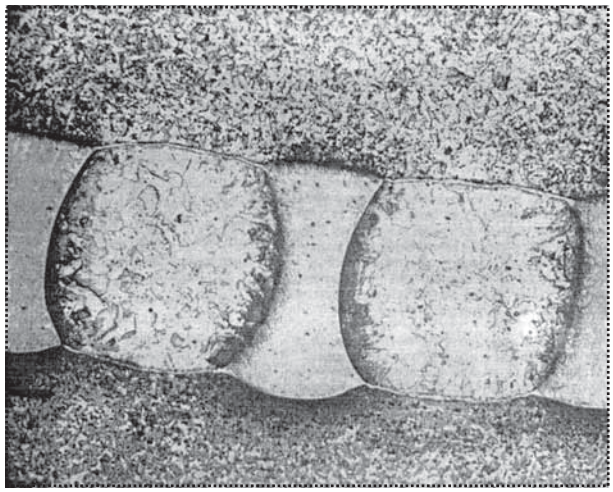


Рис. 9. Состояние паяемых поверхностей в шве, паянном с фиксированным зазором (×100)

Следовательно, использование процесса электромагнитного перемешивания расширяет возможности индукционной пайки по повышению прочности паяных соединений и снижению температуры нагрева. При сохранении прочности паяных соединений ее можно снизить на величину концентрационного переохлаждения, достигаемую в данных условиях процесса. Такого эффекта можно добиться путем замены применяемого припоя другим на той же основе, но с меньшим (на количество растворяемого при пайке) содержанием железа. При этом должна обеспечиваться полная герметичность паяного зазора.

Об интенсивности перемешивания расплава припоя свидетельствует значительное расширение фиксированного паяльного зазора (рис. 9) и глубокая местная эрозия в области флюсового включения при индукционной пайке припоем П-87 косостыковых соединений труб (рис. 10).

С целью предотвращения заметной эрозии паяемого металла припой должен иметь ограниченную растворимость.

Наиболее благоприятные условия формирования паяного шва при использовании процесса электромагнитного перемешивания обеспечиваются при фиксации между соединяемыми деталями широкого зазора в процессе плавления припоя, с последующим сближением деталей в начале охлаждения. При использовании листового (литого) припоя можно избежать дефектов усадочного характера.

При зазорах до 1 мм в швах, паянных порошковыми припоями, могут возникнуть крупные несплошности, а при аномальном изменении коэффициента

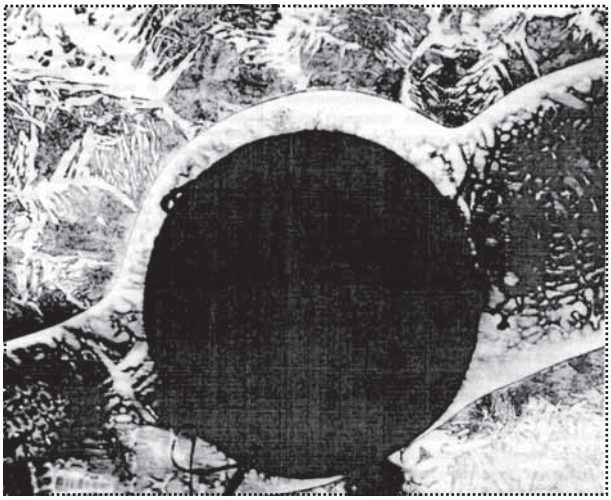


Рис. 10. Состояние паяемых поверхностей в области флюсового включения (×100)

температурного расширения припоя, связанном с изменением состава, может произойти его отслоение от паяемого металла [18].

В США создан аппарат для высокотемпературной пайки, имеющий электромагнитные насосы для перемещения жидкого припоя при высокой температуре, контактирующего с паяемыми деталями (Патент США № 5981922).

Библиографический список

1. **Абрамов О.В.** Кристаллизация металлов в ультразвуковом поле. М.: Металлургия, 1972.

2. **Белов И.П.** Опыт внедрения магнитной пайки трубопроводов систем отопления // Сварочное производство. 1983. № 11.

3. **Влияние** внешних воздействий на жидкий и кристаллизирующийся металл. Киев: Наукова Думка, 1983.

4. **Ефимов В.А., Эльдарханов А.С.** Технологии современной металлургии. М.: Новые технологии, 2004.

5. **Карабанов В.В. и др.** Определение допустимых отклонений параметров индукционной пайки стыков трубопроводов. Сборник "Ресурсосберегающие технологии. Качество и надежность паяных соединений". М.: МДНТН, 1989.

6. **Карабанов В.В., Бохоров И.О.** Развитие способа пайки металлов // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. № 4.

7. **Квасницкий В.Ф.** Сварка и пайка жаропрочных сплавов в судостроении. М.: Машиностроение, 1986.

8. **Максимова С.В., Табелев В.Д.** Влияние степени пластической деформации основного металла на свойства паяных соединений. Сборник "Прогрессивные методы высокотемпературной пайки". Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1989.

9. **Розенград Ю.Н. и др.** Установка для диффузионной сваркопайки металлических изделий // Сварочное производство. 1988. № 9.

10. **Силин Л.Л.** Применение ультразвука в литейном и сварочном процессах. М.: Металлургия, 1959.

11. **Сыроваткин А.А.** Применение ультразвука для сварки и пайки. М.: Машиностроение, 1959.

12. **Табелев В.Д. и др.** Структура и фазовый состав швов, выполненных капиллярной пайкой с применением давления // Автоматическая сварка. 1985. № 11.

13. **Табелев В.Д.** Некоторые особенности магнитной пайки // Сварочное производство. 1978. № 6.

14. **Теслин Г.П.** Пайка с применением вибрации. Л.: ЛДНТП, 1967.

15. **Фролов И.А., Фролов К.И.** Высокотемпературная пайка телескопических соединений тонкостенных стальных трубопроводов // Автоматическая сварка. 1988. № 2.

16. **Худошин А.А.** Разработка и исследование новых видов высокопрочных соединений, паянных гетерогенными припоями: дис. ... канд. техн. наук. Владимир, 2000.

17. **Шибалов В.М.** Пайка с кристаллизацией под давлением. М.: Металлургия, 1980.

18. **Шоршоров М.Х. и др.** Причины отслоения железомарганцевого припоя при пайке углеродистых и низколегированных сталей // Сварочное производство. 1987. № 7.

УДК 621.757

А.Н. Журавлев, *канд. техн. наук,* **А.В. Утянкин,** *инженер*
(Самарский государственный технический университет)
E-mail: zan.samgtu@mail.ru

Исследование влияния технологических параметров сборочно-сварочных операций на точность буровых алмазных долот

На основе моделирования в программном продукте ANSYS проведены исследования влияния технологических параметров сборочно-сварочных операций, таких как местоположение и размеры прихватки, на точность взаимного расположения деталей буровых алмазных долот.

Based on a simulation in the ANSYS program, the analysis of assembly and welding procedure process parameters (such as tack welding size and location) was completed. The research studies were on impact of assembly and welding procedure process parameters on diamond drilling bit elements spacing accuracy.

Ключевые слова: буровое алмазное долото, прихватка, точность, численная модель, тепловая деформация.

Keywords: diamond drilling bit, tack welding, accuracy, numerical model, thermal deformation.

Хотя стоимость буровых долот составляет от 1 до 5 % от общей стоимости скважины, они являются основным компонентом экономики строительства скважины. Время, необходимое для бурения скважины, напрямую зависит от скорости бурения долота и от продолжительности его работы до отказа. Правильно подобранное долото значительно снизит время бурения и количество спуско-подъемных операций.

Помимо шарошечных долот при бурении стали часто применять долота с фиксированными резцами – буровые алмазные долота (БАД). По сравнению с шарошечными долотами БАД имеют ряд значительных преимуществ:

- увеличение проходки (стойкости долота) и скорости бурения в 4–5 раз;
- уменьшение количества спуско-подъемных операций;
- улучшенный контроль направления бурения;
- значительное уменьшение вибрационной нагрузки на буровой став;
- экономия на топливе и эксплуатационных расходах до 50 %;
- снижение стоимости и времени бурения.

В наклонно-направленном бурении БАД играют очень важную роль и являются ключевыми компонентами усовершенствованных систем, предназначенных для бурения горизонтальных скважин и скважин с большим отходом от вертикали со сложным профилем. Для оптимальной работы долота во время наклонно-направленного бурения необходимо свести к минимуму все его колебания в скважине.

В связи со сказанным к конструкциям БАД предъявляются высокие требования по точности взаимного расположения рабочих (режущих) элементов долота относительно присоединительных.

Буровое алмазное долото состоит из двух основных частей: корпуса *4* и ниппеля *3* (рис. 1, см. с. 3 обложки). На корпусе располагаются режущие зубки и промывочные отверстия. Ниппель представляет собой цилиндрическую деталь, включающую в своей конструкции два типа резьбы: метрическую и присоединительную. С помощью присоединительной замковой резьбы долото присоединяется к буровой колонне. Корпус соединяется с ниппелем посредством метрической резьбы с упором в торец, затем данные детали свариваются. В качестве примера на рис. 1 показано БАД диаметром 311,1 мм с допуском на взаимное расположение соединяемых корпуса и ниппеля, равным 0,3 мм*.

* На рис. 1 в правом верхнем углу показано обозначение допуска на взаимное расположение поверхностей, в данном случае это допуск на соосность (общепринятое чертежное обозначение). Первый прямоугольник "круг в круге" – это обозначение отклонения от соосности, второй прямоугольник $0{,}3/H$ – это величина допуска, измеренная на расстоянии H, которое из чертежа равно 200 мм, третий прямоугольник "А" – это базовая поверхность, относительно которой осуществляется измерение, в данном случае это ось ниппеля, которая обозначена в нижней части (буква А в прямоугольнике).

По существующей заводской технологии резьбовое соединение изготавливается с высокой точностью, но даже это обстоятельство не дает необходимой стабильной точности расположения двух соединяемых деталей после выполнения операции сварки.

Как показывает статистика эксплуатации БАД, неточность взаимного расположения (отклонение от соосности) корпуса и ниппеля существенно влияет на работоспособность долота. Большая величина отклонения от соосности корпуса по отношению к ниппелю приводит к неравномерному износу режущих лопастей долота, тем самым ресурс долота сокращается.

Отклонение от соосности указанных деталей долота, полученное после сварки, оказывает влияние на управляемость долота при наклонно-направленном бурении и может привести к отклонению долота в скважине от заданной технологом траектории.

При выполнении операции сварки собираемые по резьбе детали нагреваются и возникают тепловые деформации, в результате которых происходит смещение либо искривление осей корпуса *1* и ниппеля *2* (отклонение от соосности). Если деформации превышают допустимые значения, то долото считается непригодным для эксплуатации и отправляется на дорогостоящую доработку.

Как показывают статистические исследования, тепловые деформации существенным образом влияют на точность взаимного расположения соединяемых деталей БАД. Установлено, что в партии из 30 собранных изделий двадцать одно (т.е. около 66 %) удовлетворяют требованию соосности, а остальные 34 % собранных изделий отправляются на доработку. Такая статистика указывает на необходимость управления процессом сборки долот, а также нахождения технологических параметров на сборочно-сварочных этапах, которые влияют на точность взаимного расположения деталей БАД.

С этой целью в программном продукте ANSYS была разработана упрощенная трехмерная модель сборки резьбосварного соединения корпуса с ниппелем БАД (с резьбовым соединением М85×2), где в качестве переменных технологических параметров использовались размеры и местонахождение прихватки.

При построении модели в программе трехмерного моделирования SolidWorks учитывали допуски на расположение торцевых поверхностей и допуски на отклонения номинальных размеров резьб. Построение вели исходя из максимально допустимых отклонений. Максимальные отклонения расположения торцевых поверхностей брали из чертежа и принимали равными 50 мкм для каждой детали. Максимальные отклонения профилей резьб принимали в соответствии с ГОСТ 16093–2004 исходя из степени точности, установленной на чертеже (6H и 6h). Ввиду ограничения вычислительных мощностей модель сборки была упрощена. В частности профиль резьбы вырезали не по спирали, а по окружности и затем данную операцию копировали вдоль оси с шагом, равным шагу резьбы. В связи с данным упрощением можно было рассматривать только половину модели сборки, ввиду ее симметрии. Так же ограничивались половиной модели сборки в вертикальном направлении на достаточном удалении от прихватки, где исключался нагрев материала.

Для упрощения разбивки на конечные элементы (КЭ) в дальнейшем данная модель была поделена на дополнительные объемы. Детали сборки сопрягались без интерференции (взаимного проникновения тел) за счет совпадения: торцев, плоскостей симметрии, вершины профиля резьбы заготовки корпуса и наклонной прямой профиля резьбы ниппеля. Далее данную сборку импортировали в ANSYS для моделирования процесса отклонения заготовки корпуса от своего первоначального положения вследствие приложения прихватки.

Процесс моделировался в несколько этапов, путем решения двух связанных задач – термической и деформационной [3]. Каждая из этих задач решалась по однотипному алгоритму:

- создание геометрии или ее импорт;
- выбор конечного элемента;
- описание моделей материалов;
- присвоение соответствующих моделей материалов соответствующим объемам;
- разбивка модели на сеть конечных элементов;
- создание контактных пар в местах контакта деталей (если есть);
- задание опций решения и приложение нагрузок;
- решение;
- анализ результатов.

Термическая задача.

В результате ее решения будут получены поля температур, образуемые в соединении при формировании прихватки. С их использованием в дальнейшем будет решена деформационная задача. В качестве конечного элемента использовали термический элемент Solid 70. При описании стали 40Х, из которой изготовлены детали, – мультилинейную модель материала.

Плотность задавалась равной 7650 кг/м^3, удельная теплоемкость – 664 Дж/(кг·°С), коэффициент линейного расширения – $1{,}2\cdot10^{-5}$ 1/°С, ссылочная температура (reference temperature), при которой тепловые деформации считались равными нулю, – 200 °С, коэффициент теплопроводности – 27 Вт/(м·°С). Модуль упругости для различных температур принимался $2{,}14\cdot10^{11}$ Па.

При описании материала прихватки использовали те же свойства, с той лишь разницей, что ссылочную температуру (reference temperature) принимали равной 800 °С. Склеивали объемы прихватки и корпуса, прихватки и ниппеля.

Далее разбивали геометрию на регулярную сеть конечных элементов (КЭ). Результат данной операции представлен на рис. 2 (см. с. 3 обложки).

В местах контакта двух тел создавали контактные пары: между торцами и между профилями резьб.

Затем прикладывали нагрузки, соответствующие этапам нагрева и остывания (шагам), при этом число подшагов на каждом шаге составляло 5, с жесткой фиксацией их числа. Тип анализа принимался "переходный" (transient).

1-й шаг – приложение прихватки. Температура нагрева прихватки – 800 °С, время формирования прихватки 20 с. Температура окружающей среды (uniform temperature) 20 °С.

2-й шаг. Время остывания 90 с. Снижаем температуру прихватки с 800 до 0 °С, включаем режим конвекции – температура 20 °С, коэффициент теплоотдачи 23 Вт/(м^2·°С).

3-й шаг. Дальнейшее остывание. Время остывания 5400 с.

В результате были получены температурные поля, которые для 3-го шага, 5-го подшага (время 5510 с) представлены на рис. 3 (см. с. 3 обложки).

Деформационная задача.

При связанной деформационной задаче использовалась та же база данных, что и при термической.

С помощью команды ETCHG,TTS производилась смена термического элемента на соответствующий деформационный без переразбивки. Это делалось для сохранения положения узлов, в которых были вычислены поля температур.

Степени свободы элементов контактных пар менялись с temp на UX,UY,UZ путем изменения опции K1 на 0. Создавались элементы болтовой затяжки. Тип анализа принимался "статический", число подшагов – 5 с возможностью их автоматического изменения.

1-й шаг – болтовая затяжка. К элементам болтовой затяжки прикладывалось усилие затяжки, рассчитываемое по формуле $F_{зат} = M_{зат}/(0{,}15D_{ср})$, где $M_{зат}$ – момент затяжки, равный 40 Н/м; $D_{ср}$ – средний диаметр резьбы, равный 0,0837 м. Прикладываемая сила фиксировалась на все время проведения деформационного расчета (16 шагов). Из расчета исключались элементы прихватки, путем использования команды EKILL.

2–16-е шаги. Из результатов расчета каждого подшага термической задачи считывались поля температур и прикладывались в качестве внешних нагрузок (15 шагов по нагрузке). В расчет включались элементы прихватки путем использования команды EALIVE.

Результаты численных экспериментов показали, что сразу после выполнения прихватки возникает смещение оси корпуса в направлении, противоположном месту прихватки. Это смещение обусловлено локальным тепловым расширением материалов соединяемых деталей в нагретой зоне. При охлаждении соединения ось корпуса начинает возвращаться в исходное положение, а после полного остывания ось оказывается смещенной в сторону прихватки. Максимальное перемещение составило 0,205 мм (рис. 4).

На основе данных численной модели было выявлено, что на величину конечного смещения оси существенное влияние оказывает размер прихватки, что позволяет использовать этот фактор для повышения точности соединения. Так, для резьбового соединения М60×2 увеличение размера прихватки с 6 до 10 мм приводит к изменению смещения оси корпуса относительно оси ниппеля с 0,2 до 0,3 мм.

Полученные в результате численного моделирования данные хорошо согласуются с экспериментальными, полученными на производстве буровых долот.

Поскольку тепловые деформации в соединении всегда направлены в сторону прихватки, это свойство предлагают использовать для регулировки взаимного положения осей соединяемых деталей БАД. При этом выбирают такие местоположения прихваток по периметру разделки кромок соединения, которые вызывают "желательные" деформации, компенсирующие смещения осей соединяемых деталей, полученные на предыдущих переходах [1]. Таким образом, с каждой следующей прихваткой осуществляют последовательное сближение осей соединяемых деталей. В процессе достижения требуемой соосности соединяемых дета-

лей при выполнении сварки формируется определенная, индивидуальная для каждого собираемого изделия структура местоположения прихваток. Эта структура является упорядоченной, поскольку местоположение каждой последующей прихватки определяется после оценки достигнутого эффекта при выполнении предшествующей прихватки.

Разработанная в программном комплексе ANSYS модель, связывающая точность взаимного расположения поверхностей сопрягаемых деталей (отклонение от соосности) соединений БАД с технологическими параметрами, такими как местоположение и размер прихватки, лежит в основе метода структурно упорядоченной сборки изделий [2].

Библиографический список

1. **Журавлев А.Н.** Анализ технологических связей структурно упорядоченной сборки резьбосварных соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 7. С. 9–11.

2. **Журавлев А.Н.** Разработка методологии структурно упорядоченной сборки сложных механических систем на основе декомпозиции взаимодействия соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 9. С. 21–27.

3. **Каплун А.Б., Морозов Е.М., Олферьева М.А.** ANSYS в руках инженера. Практическое руководство. М.: Едиториал УРСС, 2003. 272 с.

Читайте в следующем номере:

- **Касьянов П.А.** Исследование напряженного состояния в контактах опорно-поворотных устройств драглайнов
- **Магдиев Р.Р.** Расчет критериев эффективности групповых сборочных процессов в многономенклатурном производстве
- **Григоров И.В., Маликов А.А., Ямников А.С.** Технологический размерный анализ рычажного механизма
- **Демин А.А., Титов И.А., Шанулин Е.В.** Повышение качества сборки соединений с натягом при увеличенном допуске на изготовление деталей
- **Королев А.В., Болкунов В.В., Мирошкин А.Г.** Технология сборки радиально-упорных шариковых подшипников с охлаждением внутреннего кольца
- **Павлин В.Н., Голубев С.В., Новинский Э.Г., Головко В.Ф.** Опыт изготовления барабанов отработавших сборок для перегрузочного комплекса 4-го энергоблока Белоярской АЭС
- **Карабанов В.В., Бохоров И.О.** Пайка без припоя
- **Семйон Я., Янош Р., Гайдук М., Вархола М., Вагаш М., Балаж В.** Модульный принцип проектирования сварочных приспособлений для роботизированных ячеек
- **Шашурин В.Д., Ветрова Н.А., Мешков С.А.** Обеспечение надежности смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах на этапе их сборки

УДК 621.8

В.Ф. Безъязычный, *д-р техн. наук,* **В.М. Федулов,** *инженер*
(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)
E-mail: root@rgata.ru

К вопросу технологического обеспечения качества соединений деталей при сборке с гарантированным натягом

Изложены теоретические положения по расчетному определению величины натяга при сборке соединений с гарантированным натягом с учетом параметров качества поверхностного слоя и технологических условий обработки.

The article describes the techniques of calculation of interference value during the assembly taking into consideration surface layer quality parameters and machining technological conditions.

Ключевые слова: сборка, натяг, шероховатость поверхности, технологическое условие обработки, способ выполнения соединений.

Keywords: assembly, interference, surface roughness, machining technological condition, technique of assembly.

Достаточно широкое применение в конструкциях машин, механизмов и узлов находят неподвижные соединения деталей с гарантированным натягом, работоспособность которых обеспечивается за счет сил трения между сопрягаемыми поверхностями. Силы трения возникают в результате создания натяга Δ между цилиндрическими поверхностями, т.е. превышения размера d_2 охватываемой поверхности детали *2* над размером d_1 охватывающей поверхности детали *1* и, вследствие этого появления сил нормального давления p (рис. 1).

Соединения с гарантированным натягом служат для обеспечения центрирования сборочных элементов, а также передачи крутящих моментов и осевых сил. Такие соединения используют при сборке валов и дисков турбин, подшипников качения с валами, венцов крупных зубчатых колес, шкивов и других деталей цилиндрической формы.

Для обеспечения качества соединения сопрягаемые поверхности должны иметь строго определенные размеры, шероховатость, конфигурацию, быть чистыми и неповрежденными, чтобы получить заданный диаметральный натяг в сопряжении и правильное взаимное расположение без перекосов сопрягаемых сборочных элементов. Величина натяга задается исходя из условий работы данного соединения и передаваемого момента и силы. На него также оказывает влияние шероховатость контактируемых поверхностей. В процессе соединения собираемых деталей часть высоты микронеровностей при запрессовке сминается, и расчетный натяг уменьшается. По способу получения соединений с гарантированным натягом они могут быть продольно-прессовыми и поперечно-прессовыми.

При *продольно-прессовом соединении* (запрессовке) одну сопрягаемую деталь под действием прикладываемых вдоль оси сил запрессовывают в другую.

В *поперечно-прессовых* соединениях сближение сопрягаемых поверхностей происходит в радиальном направлении (нормально к поверхности) и может осуществляться в процессе изменения размеров при увеличении или понижении температуры материала путем нагревания перед сборкой охватывающей детали *1* (втулки), охлаждения охватываемой детали *2* (вала) либо комбинацией нагревания и охлаждения. Поперечно-прессовые соединения используют при повышенных натягах между сопрягаемыми поверхностями, которые дополняются требованиями сохранения качества поверхностей, необходимости последующей разборки. К их числу относятся также гидропрессовые способы соединений.

Тепловое воздействие на детали для образования между ними соединений с натягом призвано создать

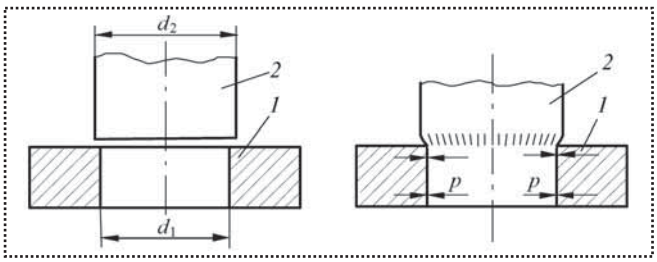


Рис. 1. Схема образования натяга между цилиндрическими поверхностями

временный термический зазор между их поверхностями, который образуется в результате предварительного нагрева охватывающей детали, охлаждения охватываемой детали, одновременного нагрева охватывающей и охлаждения охватываемой деталей. Поперечно-прессовые соединения нашли широкое применение в машиностроении, так как их прочность выше прочности продольно-прессовых, поскольку не происходит срезания микронеровностей сопрягаемых деталей в процессе запрессовки. Выбор конкретных способов тепловых воздействий зависит от величины натяга в данном соединении, конструкции деталей, а также от физико-механических свойств материала деталей.

Температура нагрева охватывающей детали определяется с учетом расчетного натяга, коэффициента температурного расширения материала и температуры окружающей среды в производственном помещении. Максимальная температура нагрева не должна вызывать изменения физико-механических свойств материала или возникновения остаточных термических напряжений. Для стальных нетермообработанных деталей допустимая температура 300...350 °С, для термообработанных – 200...230 °С. Нижний уровень температуры нагрева ограничивается условием собираемости сопряжения, при котором обеспечивается возможность совмещения осей поверхностей и взаимное свободное перемещение на требуемую величину.

Температуру воздействия на детали определяют в зависимости от физических свойств материала, номинального диаметра сопрягаемых поверхностей d, величины требуемого натяга Δ и условия легкого соединения сопрягаемых деталей [6]:

$$K_\alpha t_н d \geq \Delta = d_2 - d_1,$$

где K_α – коэффициент линейного расширения материала, 1/°С;

d – номинальный диаметр сопряжения;

d_1 и d_2 – размеры охватываемой и охватывающей деталей соответственно;

$t_н$ – температура нагрева, °С, которая может быть определена по формуле

$$t_н \geq \frac{\Delta}{K_\alpha d}.$$

На практике для расчета температуры термовоздействия как при нагреве, так и при охлаждении целесообразно пользоваться скорректированной формулой, учитывающей изменение натяга вследствие смятия шероховатостей поверхностей собираемых деталей, охлаждение деталей в процессе их установки перед запрессовкой, а также возможность свободной установки деталей

$$t = \frac{\Delta \pm i}{K_\alpha d} + t_о,$$

где i – поправка, учитывающая термический сборочный зазор и изменение размеров объекта сборки за время его транспортировки к месту сборки, мм. С достаточной точностью можно принять $i = 0{,}01\sqrt{d}$;

$t_о$ – температура окружающей среды, °С. Данную поправку принимают увеличивающей (со знаком "+") при определении температуры нагрева и уменьшающей – при сборке с охлаждением.

Расчетная температура нагрева или охлаждения может быть уточнена по условиям сохранения эксплуатационных свойств материала или возможностям технической реализации. Такая корректировка необходима при возможном превышении температуры нагрева предельной величины, при которой материал приобретает необратимые изменения физико-механических свойств или структуры, а также при существенном снижении технико-экономической эффективности сборки при использовании низкотемпературных хладоносителей.

Значения коэффициента температурного расширения (сужения), необходимые при расчетах для определения температуры нагрева и охлаждения, приведены в табл. 1.

Большое влияние на прочность сопряжения деталей, собираемых с использованием термовоздействия, оказывает фактический натяг. В процессе подготовки деталей к сборке он существенно зависит от разности размеров охватываемой и охватывающей поверхностей. В процессе эксплуатации фактический натяг может меняться под воздействием температуры

Таблица 1

Коэффициенты температурного расширения (сужения) материалов собираемых деталей

Материал	$K_\alpha \cdot 10^{-6}$, 1/°С	
	Нагрев	Охлаждение
Сталь и стальное литье	11	– 8,5
Чугун	10	– 8
Медь	16	– 14
Бронза	17	– 15
Латунь	18	– 16
Алюминиевые сплавы	22	– 18
Магниевые сплавы	26	– 21

от расширения охватываемой детали, под действием центробежных сил, а также вследствие фреттинг-износа, при знакопеременных микроперемещениях сопрягаемых поверхностей. Поэтому при сборке ответственных узлов рекомендуется использовать способы селективной сборки и учитывать условия эксплуатации.

Поперечно-прессовая сборка деталей с использованием теплового воздействия повышает прочность соединения в 1,5...2,5 раза по сравнению со сборкой путем осевой запрессовки. Сборка соединений с использованием охлаждения позволяет еще на 10...15 % увеличить эту характеристику, обычно определяемую как способность препятствовать осевому сдвигу или повороту втулки относительно вала по величине передаваемого сопряжением крутящего момента $M_{кр}$ или осевой силы P_o:

$$M_{кр} = 0{,}5 f \pi d^2 L p; \qquad (1)$$

$$P_o = f \pi d l p, \qquad (2)$$

где f – коэффициент трения в стыке;

d – номинальный диаметр сопряжения, мм;

L – длина сопряжения поверхностей, мм;

p – давление на поверхности контакта, МПа.

Существенное влияние на нагрузочную способность сопряжения оказывает при конкретном конструктивном исполнении коэффициент трения, зависящий от состояния поверхности и наличия промежуточных смазочных сред.

В отличие от осевой запрессовки, в процессе сборки с термовоздействием исключается сглаживание шероховатости. Выступы каждой из сопрягаемых поверхностей частично внедряются во впадины противолежащей, существенно повышая площадь фактического контакта, что и проводит к значительному увеличению коэффициента трения. Прочность соединений зависит от всех основных параметров шероховатости: высоты неровностей, радиусов скругления вершин и впадин, шага и углов наклона боковых сторон неровностей. Рекомендуемый диапазон значений шероховатости поверхностей сопрягаемых деталей по параметру *Ra* приведен в табл. 2 (данные профессора А.С. Зенкина и др.).

При сборке соединений путем осевой запрессовки происходит смятие неровностей, вследствие чего уменьшается номинальный натяг $\Delta_н$ и ослабляется посадка. Поэтому расчетный натяг $\Delta_р$, необходимый для определения давления на поверхности сопряжения, определяется с учетом высоты неровностей:

$$\Delta_р = \Delta_н - 1{,}2(Rz_1 + Rz_2), \qquad (3)$$

Таблица 2

Рекомендуемые значения высоты неровностей сопрягаемых поверхностей

Точность размера (квалитет)	Поверхность	Значения высоты неровностей, мкм, при номинальном диаметре посадки, мм		
		до 30	30...180	180...500
11...14	Вал	1,6	1,6	1,6...3,2
	Отверстие	0,4	0,4	0,8
13...14	Вал	3,2	3,2	6,3...3,2
	Отверстие	0,8	0,8	1,6
15	Вал	3,2	3,2	6,3...3,2
	Отверстие	1,6	1,6	1,6

где Rz_1 и Rz_2 – высота неровностей контактируемых поверхностей.

При одновременном нагружении соединения с натягом осевой силой P_o и крутящим моментом $M_{кр}$ условие прочности соединения с учетом формул (1) и (2) запишется следующим выражением:

$$P = K\sqrt{P_o^2 + \left(\frac{2M_{кр}}{d}\right)^2} = K\sqrt{(f\pi dLp)^2 + (f\pi dLp)^2} = 1{,}42\,Kf\pi dLp, \qquad (4)$$

где P – осевая сила, действующая на поверхности контакта, Н;

K – коэффициент запаса прочности соединения.

Осевая сила, действующая на поверхности контакта, определяется по формуле [6]:

$$P = \frac{1}{d}\frac{\Delta_р}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}},$$

где E_1 и E_2 – модули упругости материалов охватываемой и охватывающей деталей;

C_1 и C_2 – безразмерные коэффициенты:

$$C_1 = \frac{d^2 + d_o^2}{d^2 - d_o^2} - \mu_1 \text{ и } C_2 = \frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2.$$

Здесь d_o – диаметр отверстия пустотелой охватываемой детали; μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона материалов охватываемой и охватывающей деталей; D – диаметр наружной поверхности охватывающей детали.

С учетом выражения (3) получим

$$P = \frac{1}{d}\frac{[\Delta_н - 1{,}2(Rz_1 + Rz_2)]}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}}. \qquad (5)$$

Подставив в выражение (4) уравнение (5), окончательно получим:

$$P = \frac{1{,}42\,Kf\pi L[\Delta_н - 1{,}2(Rz_1 + Rz_2)]}{\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}}. \qquad (6)$$

Подставив в формулу (6) значения C_1 и C_2, после преобразования получим:

$$P = \frac{1{,}42\,E_1 E_2 Kf\pi L[\Delta_н - 1{,}2(Rz_1 + Rz_2)]}{E_2\left(\frac{d^2 + d_o^2}{d^2 - d_o^2} - \mu_1\right) + E_1\left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}.$$

При действии только осевой силы P_o

$$P = \frac{E_1 E_2 Kf\pi L[\Delta_н - 1{,}2(Rz_1 + Rz_2)]}{E_2\left(\frac{d^2 + d_o^2}{d^2 - d_o^2} - \mu_1\right) + E_1\left(\frac{D^2 + d^2}{D^2 - d^2} + \mu_2\right)}.$$

Высота неровностей Rz может быть определена по формулам [1]:

- при $\varphi_1 < \arcsin\frac{S}{2r}$; $\varphi < \arcsin\frac{S}{2r}$

$$Rz = \frac{\sin\varphi\cos\varphi_1}{\sin(\varphi + \varphi_1)}\left[S_ф \cdot 10^{-3} - (r \cdot 10^{-3})\left(\operatorname{tg}\frac{\varphi}{2} + \operatorname{tg}\frac{\varphi_1}{2}\right)\right]; \qquad (7)$$

- при $\varphi > \arcsin\frac{S}{2r}$; $\varphi_1 < \arcsin\frac{S}{2r}$

$$Rz = r \cdot 10^{-3}(1 - \cos\varphi_1) + S_ф \cdot 10^{-3}\sin\varphi_1\cos\varphi_1 - \\ - \sin\varphi_1\sqrt{S_ф \cdot 10^{-3}\sin\varphi_1[2(r \cdot 10^{-3}) - S_ф \cdot 10^{-3}\sin\varphi_1]}; \qquad (8)$$

- при $\varphi < \arcsin\frac{S}{2r}$; $\varphi_1 > \arcsin\frac{S}{2r}$

$$Rz = r \cdot 10^{-3}(1 - \cos\varphi) + S_ф \cdot 10^{-3}\sin\varphi\cos\varphi - \\ - \sin\varphi\sqrt{S_ф \cdot 10^{-3}\sin\varphi[2(r \cdot 10^{-3}) - S_ф \cdot 10^{-3}\sin\varphi]}; \qquad (9)$$

- при $\varphi > \arcsin\frac{S}{2r}$; $\varphi_1 > \arcsin\frac{S}{2r}$

$$Rz = \frac{(S_ф \cdot 10^{-3})^2}{8r \cdot 10^{-3}}, \qquad (10)$$

где

$$S_ф = \frac{1}{\tau_p\left[1 + \frac{1}{B} + \operatorname{tg}(\operatorname{arctg}B - \gamma)\right]}\left\{\begin{array}{l}\dfrac{a_1^{0,125} b_1^{0,7} c\rho\theta\rho^{0,1} a^{0,43}(2{,}85\sin^{0,115}\alpha v^{0,57} a_1^{0,345}\lambda b^{0,3} + 0{,}6625\lambda_p\beta\varepsilon a^{0,57}\rho_1^{0,075})}{v\lambda\sin^{0,165}\alpha} - \\ -0{,}5\tau_p\rho_1 b\left\{\arccos[1 - a_2 B^{-b_2(1-\sin\gamma)^{-x}}] + \dfrac{a_2 B^{1-b_2(1-\sin\gamma)^{-x}}}{\sin\alpha(\cos\gamma + B\sin\gamma)} + \dfrac{\delta}{\rho_1}\right\}\cos\alpha\end{array}\right\}. \qquad (11)$$

В формулах (7)...(11) приняты следующие условные обозначения: S – подача, мм; r – радиус при вершине резца в плане, мм; φ и φ_1 – главный и вспомогательный углы резца в плане, градус; t – глубина резания, мм; τ_p – сопротивление обрабатываемого материала пластическому сдвигу, Па; $B = 1/\operatorname{tg}\beta_1$ – безразмерный комплекс процесса резания; β_1 – угол сдвига стружки, градус; γ – передний угол резца, градус; a_1 и b_1 – толщина и ширина среза соответственно, мм; $c\rho$ – удельная объемная теплоемкость обрабатываемого материала, $\frac{Дж}{м^3 \cdot К}$; θ – температура в зоне резания, °С; ρ_1 – радиус округления режущей кромки резца, мм; a – температуропроводность, обрабатываемого материала, м/с^2; α – задний угол резца, градус; v – скорость резания, м/с; λ и λ_p – температуропроводности обрабатываемого и инструментального материалов соответственно, Вт/(м^2·К); b – длина контакта режущих кромок инструмента с обрабатываемым материалом в зоне резания, мм; β и ε – угол заострения и угол при вершине резца в плане соответственно, радиан; a_2, b_2, x – величины, зависящие от значения безразмерного комплекса B [1]; δ – длина фаски износа режущего инструмента по задней грани, мм.

Значения Rz при расчете по формулам (7)...(10) получаются в мкм.

При оптимальных скоростях резания, соответствующих минимуму износа режущего инструмента, высота неровностей на обработанной поверхности рассчитывается по формуле

$$Rz = \frac{1}{8r}\left\{\begin{array}{l}0{,}6625 a_1^{0,125} c\rho\theta_0 \times \\ \times\dfrac{4{,}3\sin^{0,115}\alpha v^{0,57} a_1^{0,345}\lambda\left(\frac{t}{m}\right)^{0.3} + \lambda_p\beta\varepsilon a^{0,57}\rho_1^{0,075}}{\tau_p a^{-0,43}\sin^{0,025}\alpha v_0\lambda t^{0,25} m^{0,74-n_0} c_0 b^{0,04}\rho_1^{n_0-0,1}(1 - 0{,}45\sin\gamma)}\end{array}\right\}^{\frac{2}{1-n_0}}, \qquad (12)$$

где $m = a_1/S$ – коэффициент, зависящий от геометрических параметров режущего инструмента [1]; θ_o – оптимальная температура в зоне резания, °С; v_o – оптимальная скорость резания, м/с; c_0 и n_0 – величины, зависящие от соотношения толщины среза и размера округления режущей кромки [1].

Если скорость резания изменяется от скорости наибольшего наростообразования $v_{нар}$ до оптимальной v_o, то при

$$r[1-\sqrt{1-(S/2r)^2}] \le t \le r(1-\cos\varphi)$$

высота неровностей

$$Rz = \frac{1}{8r}\left\{\frac{1}{\tau_p\left[1+\frac{1}{B}\mathrm{tg}(\mathrm{arctg}B-\gamma)\right]}\times\right.$$
$$\left.\times\left\{\frac{a_1^{0,125}b_1^{0,7}c\rho\theta\rho^{0,1}a^{0,43}[2,85\sin^{0,115}\alpha v^{0,57}a_1^{0,345}\lambda b^{0,3}+0,6625\lambda_p\beta\varepsilon a_1^{0,57}\rho_1^{0,075}}{v\lambda\sin^{0,165}\alpha}-\right.\right.$$
$$\left.\left.-0,5\tau_p\rho_1 b\left[\arccos(1-a_2B)^{-b_2(1-\sin\gamma)^{-x}}+\frac{a_2B^{1-b_2(1-\sin\gamma)^{-x}}}{\sin\alpha(\cos\gamma+B\sin\gamma)}+\frac{\delta}{\rho_1}\right]\cos\alpha\right\}\right\}^2.$$

При осуществлении соединений с натягом способами термовоздействия не происходит срезания микронеровностей, а происходят упругие и пластические деформации микронеровностей в пределах заполнения впадин микронеровностей на контактируемых поверхностях. В связи с этим

$$\Delta_р = \Delta_н - (y_{пл} + y_{упр}),$$

где $y_{пл}$ – пластическая деформация поверхностного слоя; $y_{упр}$ – упругая деформация поверхностного слоя.

Формулы для определения пластических $y_{пл}$ и упругих $y_{упр}$ деформаций выступов микронеровностей контактирующих поверхностей имеют следующий вид [3]:

при $\varphi > \arcsin\frac{S}{2r}$ и $\varphi_1 > \arcsin\frac{S}{2r}$

$$y_{пл} = 0,546\left(\frac{S_ф^2}{8r\cdot10^{-3}}\right)^{1,02}\left[\frac{\left(r_1+r_2+\sin\omega\sqrt{r_{пр_1}r_{пр_2}}+\cos\left(\frac{\pi}{2}-\omega\right)\sqrt{r_{поп_1}r_{поп_2}}\right)K}{r_2}\times\right.$$
$$\left.\times\frac{v^{0,28}r^{3,5}S^{1,7}\alpha^{0,09}\gamma^{0,33}}{7,08-10^{-6}\tau_p^{0,75}S_ф^{0,6}t^{0,06}\rho_1^{0,17}\varphi^{0,35}\delta^{0,35}}\frac{100N_1N_2k_5}{t_m}\left(\frac{PE}{2\pi r_2\sigma_{T_2}}\right)^{m_2}(ck_3)^{1-m}\right]^{\frac{1}{v_1}}; \quad (13)$$

$$y_{упр} = \frac{P}{\left(\frac{0,25\pi S_{m_1}}{18,7\cdot10^3\,Rz_1^{1,02}Rz_2^{1,02}}\right)^{0,5}}k(e)\frac{1-\mu^2}{E}(c\sigma_T)\frac{S_m}{95,5Rz^{1,02}}. \quad (14)$$

В формулах (13) и (14) приняты следующие условные обозначения: r_1, r_2 – приведенный радиус закругления вершины единичной микронеровности; мм; $r_{пр_1}$, $r_{пр_2}$ – радиус закругления вершины единичной микронеровности в продольном направлении, мм; $r_{поп_1}$, $r_{поп_2}$ – радиус закругления вершины единичной микронеровности в поперечном направлении, мм; N_1, N_2 – число вершин микронеровностей, находящихся в контакте; v_1 – пара-

метр кривой опорной поверхности шероховатости; Rz_1, Rz_2 – высота неровностей профиля контактирующих поверхностей в поперечном направлении, мм; m_2 – показатель степени, определяемый как сумма параметров кривых опорных поверхностей; k_5 – коэффициент, полученный в результате численного решения исходного интегрального уравнения для отыскания фактической площади контакта; k_3 – коэффициент, учитывающий изменение величины сближения контактирующих поверхностей при деформации микронеровностей за счет осадки основания; K – коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала; h_c – глубина наклепа в поверхностном слое контактирующей поверхности; $k(e)$ – эллиптический интеграл первого рода; $c\delta_T$ – напряжение, приводящие в пластическое состояние выступ, где c – коэффициент; E – модуль упругости материала детали, МПа; μ – коэффициент Пуассона материала детали; t_m – относительная длина опорной поверхности на уровне средней линии; S_m – средний шаг неровностей профиля, мм; P – нагрузка на контактируемые поверхности, Н; ω – угол взаимного расположения следов обработки на контактирующих поверхностях, градус.

Перспективным направлением повышения эффективности и качества сборки соединений с натягом является применение ультразвука. Авторами использованы результаты исследований, проведенных в Самарском государственном техническом университете под руководством профессора Б.Л. Штрикова [5].

Рассмотрим две схемы воздействия ультразвуковых колебаний на вал. Согласно схеме на рис. 2, *а*, продольные колебания сообщаются валу, не прикрепленному к концентратору, в результате чего взаимодействие концентратора *1* и вала *2* носят дискретный характер. На рис. 2, *б* вал жестко крепится цанговым зажимом *3* к концентратору и является, таким образом, частью ультразвуковой колебательной системы. Аналогично могут сообщаться колебания и втулке.

Наукоемкость этого метода сборки заключается в установлении зависимостей между эксплуатационным свойством соединения, которое можно характеризовать силой распрессовки или несущей способности соединений на сдвиг $M_{кр}$, и режимами запрессовки (скорость запрессовки v, амплитуда ξ и частота колебаний f , а также величиной натяга).

В исследовании [5] силу запрессовки рекомендуется осуществлять с использованием зависимости:

$$P_з = F_o\{f_o \sin n\mathrm{v} - f_1 \mathrm{v}_o - f_1 \xi\omega + \\ + f_1 \mathrm{v}_o^2 + 2 f_2 \mathrm{v}_o \xi\omega + f_2 \xi^2 \omega^2\},$$

где F_o – максимальная сила трения между поверхностями соединяемых деталей в обычных условиях;

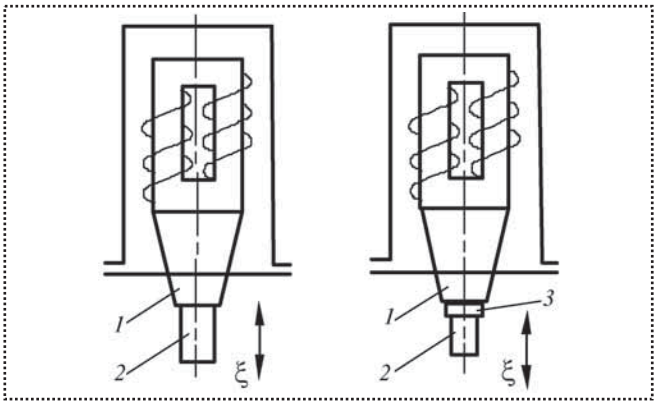


Рис. 2. Принципиальные схемы сообщения ультразвуковых колебаний валу при сборке

v_o – скорость скольжения в обычных условиях;

ξ – амплитуда колебаний;

$\omega = 2\pi f_k$ круговая (угловая) частота;

f_k – частота колебаний;

$$\mathrm{singnv} = \begin{cases} +1 & \text{при} \quad \mathrm{v} > 0 \\ -1 & \text{при} \quad \mathrm{v} < 0 \end{cases};$$

значения f_o, f_1 и f_2 определяются по табл. 3.

Оптимальное значение колебательной скорости

$$\mathrm{v} = \frac{f_1 - 2 f_2 \mathrm{v}_o}{2 f_2}.$$

Режимы запрессовки в рассматриваемом исследовании изменялись в пределах: скорость v = = 0,001...0,01 м/с, амплитуда колебаний ξ = = 5...20 мкм, частота f = 22 кГц. Величина натяга Δ варьировалась от 0,005 до 0,02 мм. В качестве втулок использовались внутренние кольца подшипников № 25, 202 и 203 из стали ШХ15СГ (HRC 62...64) с шероховатостью посадочных поверхностей *Ra* 0,20...0,32 мкм, а также втулки из стали ШХ15СГ (НВ 210), из стали 45 (НВ 200) с *Ra* 0,63...1,25 мкм. Валы изготавливали из тех же материалов.

Исследования показали, что введение ультразвуковых колебаний в зону соединения деталей изменяет характер взаимодействия их поверхностей, что проявв-

Таблица 3

Значения коэффициентов f_i

Сила, действующая вдоль осей сопрягаемых деталей, Н	Значения коэффициентов		
	f_0	f_1	f_2
5,0	0,731	0,502	0,099
20,0	2,11	0,874	0,174

ляется, в частности, в снижении силы запрессовки во всем принятом диапазоне режимов.

Зависимости между величиной натяга, амплитудой колебаний и параметрами шероховатости, определяющими несущую способность поверхностей при ультразвуковой сборке по схеме, показанной на рис. 2, *а*, следующие:

$$Ra = 0{,}105\xi^{0{,}28}\Delta_{\text{р}}^{-0{,}16};\ R_{\text{р}} = 0{,}05\xi^{0{,}51}\Delta_{\text{р}}^{-0{,}38};$$

$$t_m = 1{,}84\xi^{-0{,}16}\Delta_{\text{р}}^{0{,}18};\ r_{\text{вс}} = 6{,}289\cdot 10^{4}\,\xi^{-0{,}77}\Delta_{\text{р}}^{0{,}65}.$$

При ультразвуковой сборке по схеме, показанной на рис. 2, *б*:

$$Ra = 0{,}224\xi^{0{,}19}\Delta_{\text{р}}^{-0{,}11};\ R_{\text{р}} = 0{,}411\xi^{0{,}29}\Delta_{\text{р}}^{-0{,}17};$$

$$t_m = 0{,}780\xi^{-0{,}07}\Delta_{\text{р}}^{0{,}10};\ r_{\text{вс}} = 1{,}887\cdot 10^{3}\,\xi^{-0{,}37}\Delta_{\text{р}}^{0{,}26},$$

где Ra – среднее арифметическое отклонение профиля неровностей; $R_{\text{р}}$ – высота сглаживания (расстояние от линии выступов неровностей до средней линии в пределах базовой длины); t_m – относительная опорная длина на уровне средней линии; $r_{\text{вс}}$ – средний радиус выступов.

Для обеспечения требуемых параметров шероховатости поверхности с целью обеспечения соответствия между ними, а также расчетным натягом и амплитудой колебания необходимо рассчитывать режимы обработки.

При обработке лезвийным инструментом

$$Ra = 0{,}2\,Rz;\ R_{\max} = 6\,Ra;$$
$$R_{\text{р}} = 2{,}6\,Ra;\ Ra = 0{,}2\,Rz;$$

$$t_{\text{р}} = 1 - \left(\frac{R_{\max} - p}{R_{\max} - R_{\text{р}}}\right)^{\nu_2};$$

$$\nu_2 = 2(1 - t_m)\frac{R_{\max} - R_{\text{р}}}{Ra} - 1;$$

$$r_{\text{вс}} = 0{,}24\frac{t_m^2 S_m^2}{Ra},$$

где S_m – средний шаг неровностей профиля.

Учитывая, что при обработке лезвийным инструментом t_m= 0,5, а также то, что на уровне средней линии $p = R_{\text{р}}$, после преобразования получим при ультразвуковой сборке по схеме, показанной на рис. 2, *а*, из условия расчета $\Delta_{\text{р}}$ по значению Ra

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt[-0{,}16]{0{,}25r\left\{\frac{0{,}6625a_1^{0{,}125}c\rho\theta_0 \times \left[4{,}3\sin^{0{,}115}\alpha\nu^{0{,}57}a_1^{0{,}57}\lambda\left(\frac{t}{m}\right)^{0{,}3} + \lambda_p\beta\varepsilon\alpha^{0{,}57}\rho_1^{0{,}075}\right]}{\tau_p a^{-0{,}43}\sin^{0{,}025}\alpha\nu_0\lambda t^{0{,}25}m^{0{,}74-n_0}c_0 b^{0{,}04}\rho_1^{n_0-0{,}1}(1-0{,}45\sin\gamma)}\right\}^{\frac{2}{1-n_0}}}.$$

При условии обеспечения значения $R_{\text{р}}$ расчетную величину натяга определяют по формуле

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt[-0{,}38]{1{,}3r\left\{\frac{0{,}6625a_1^{0{,}125}c\rho\theta_0 \times \left[4{,}3\sin^{0{,}115}\alpha\nu^{0{,}57}a_1^{0{,}57}\lambda\left(\frac{t}{m}\right)^{0{,}3} + \lambda_p\beta\varepsilon\alpha^{0{,}57}\rho_1^{0{,}075}\right]}{\tau_p a^{-0{,}43}\sin^{0{,}025}\alpha\nu_0\lambda t^{0{,}25}m^{0{,}74-n_0}c_0 b^{0{,}04}\rho_1^{n_0-0{,}1}(1-0{,}45\sin\gamma)}\right\}^{\frac{2}{1-n_0}}}.$$

При обеспечении значения $r_{\text{вс}}$ расчетную величину натяга определяют по формуле

$$\Delta_p = \sqrt[0{,}65]{0{,}048\cdot 10^{-4}\frac{S_m}{Rz}\xi^{0{,}77}}.$$

Значения S_m определяют по табл. 4 [1].

При ультразвуковой сборке по схеме, показанной на рис. 2, *а*,

$$Ra = 0{,}105\xi^{0{,}28}\Delta_{\text{р}}^{-0{,}16}.$$

Таблица 4

Значение параметра S_m от соотношения r, φ и φ_1

Соотношение r, φ и φ_1	Значение S_m
$S \le 2r\sin\varphi_1$	$2\sqrt{Rz(2r - Rz)}$
$2r\sin\varphi_1 < S \le$ $\le r\left[\dfrac{1-\cos(\varphi+\varphi_1)}{\sin\varphi_1}\right]$	$2r\sin\varphi \times$ $\times\left[\varphi_1 - \operatorname{arctg}\dfrac{r-(1-\cos\varphi_1)-0{,}5Rz}{r\sin\varphi_1}\right]+$ $+ Rz\operatorname{ctg}\varphi_1$
$S > r\left[1-\dfrac{\cos(\varphi+\varphi_1)}{\sin\varphi_1}\right]$	$\dfrac{2r(1-\cos\varphi_1)}{\sin\varphi_1} + 0{,}5Rz(\operatorname{ctg}\varphi + 3\operatorname{ctg}\varphi_1)$

Так как $Ra = 0{,}2Rz$, то

$$0{,}2\,Rz = 0{,}105\xi^{0,28}\Delta_{\text{р}}^{-0,16}.$$

Откуда определяем

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt[-0,16]{\frac{0{,}2\,Rz}{0{,}105\xi^{0,28}}} = \sqrt[-0,16]{\frac{2\,Rz}{\xi^{0,28}}}. \qquad (15)$$

Подставляя в формулу (15) значение Rz, из формулы (12), получим

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt[-0,16]{\frac{0{,}25r}{\xi^{0,28}}\left\{0{,}6625a_1^{0,125}c\rho\theta_0\frac{4{,}3\sin^{0,115}\alpha v^{0,57}a_1^{0,57}\lambda\left(\frac{t}{m}\right)^{0,3}+\lambda_p\beta\varepsilon\alpha^{0,57}\rho_1^{0,075}}{\tau_p a^{-0,43}\sin^{0,025}\alpha v_0\lambda t^{0,25}m^{0,74-n_0}c_0 b^{0,04}\rho_1^{n_0-0,1}(1-0{,}45\sin\gamma)}\right\}^{\frac{2}{1-n_0}}}.$$

Высота сглаживания $R_{\text{р}}$ по схеме, показанной на рис. 2, *а*, определяется по формуле

$$R_{\text{р}} = 0{,}05\xi^{0,51}\Delta_{\text{р}}^{-0,38}.$$

Так как $Ra = 0{,}2Rz$ и $R_{\text{р}} = 2{,}6Ra$, то $R_{\text{р}} = 0{,}52Rz$, откуда

$$0{,}52\,Rz = 0{,}05\xi^{0,51}\Delta_{\text{р}}^{-0,38}.$$

Расчетный натяг

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt[-0,38]{\frac{0{,}52\,Rz}{0{,}05\xi^{0,51}}} = \sqrt[-0,38]{\frac{10{,}4Rz}{\xi^{0,51}}}. \qquad (16)$$

Подставляя в (16) значение Rz из формулы (12), получим

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt[-0,38]{\frac{1{,}3r}{\xi^{0,51}}\left\{0{,}6625a_1^{0,125}c\rho\theta_0\frac{4{,}3\sin^{0,115}\alpha v^{0,57}a_1^{0,57}\lambda\left(\frac{t}{m}\right)^{0,3}+\lambda_p\beta\varepsilon\alpha^{0,57}\rho_1^{0,075}}{\tau_p a^{-0,43}\sin^{0,025}\alpha v_0\lambda t^{0,25}m^{0,74-n_0}c_0 b^{0,04}\rho_1^{n_0-0,1}(1-0{,}45\sin\gamma)}\right\}^{\frac{2}{1-n_0}}}.$$

Параметр $r_{\text{вс}}$ определяют из выражения

$$r_{\text{вс}} = 6{,}289\cdot10^4\,\xi^{-0,77}\Delta_{\text{р}}^{0,65}.$$

Так как $r_{\text{вс}} = 0{,}24\dfrac{t_m^2 S_m^2}{Ra}$ и $Ra = 0{,}2Rz$, а параметр t_m при лезвийной обработке можно принять равным 0,5, то

$$r_{\text{вс}} = 0{,}24\frac{0{,}5^2 S_m^2}{0{,}2\,Rz} = 0{,}3\frac{S_m^2}{Rz}.$$

Поэтому

$$\Delta_{\text{р}} = \sqrt[0,65]{\frac{0{,}3\dfrac{S_m^2}{Rz}}{6{,}289\cdot10^4\,\xi^{-0,77}}} = \sqrt[0,65]{0{,}048\cdot10^{-4}\frac{S_m^2}{Rz}\xi^{0,77}}.$$

Вывод

Установлена взаимосвязь между величиной натяга при сборке неподвижных соединений и параметрами качества поверхностного слоя, а также технологическими условиями обработки.

Библиографический список

1. **Автоматизация** технологии изготовления газотурбинных авиационных двигателей. Часть первая / В.Ф. Безъязычный, В.Н. Крылов, В.А. Полетаев и др.; под ред. В.Ф. Безъязычного и В.Н. Крылова. М.: Машиностроение, 2005. 560 с.

2. **Вологин М.Ф., Калашников В.В., Нерубой М.С., Штриков Б.Л.** Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке. М.: Машиностроение, 2002. 264 с.

3. **Дмитриева М.Н.** Обеспечение контактной жесткости деталей машин на основе управления технологическими условиями обработки: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2010.

4. **Зенкин Ф.С., Лабудина О.В., Павленко В.Н.** Расчет технологических сборочных параметров при формировании соединений с натягом с использованием глубокого холода // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2001. № 10. С. 8–10.

5. **Суслов А.Г., Федоров В.П., Горленко О.А.** и др. Технологическое обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / под общей ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.

6. **Энциклопедия** "Машиностроение". Том III-5. "Технология сборки в машиностроении". Под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 2006. 640 с.

УДК 621.9.047

А.П. Печагин, *инженер,* **А.И. Болдырев,** *канд. техн. наук (Воронежский ГТУ),*
Г.Н. Климова, *канд. техн. наук (Воронежская государственная лесотехническая академия)*
E-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Стабилизация геометрии литых чугунных и стальных сборных конструкций путем воздействия электромагнитными импульсами

Показана суть метода импульсной магнитной стабилизации геометрии сборных корпусных деталей. Исследовано состояние поверхностного слоя после электромагнитного воздействия. Проведена экспериментальная оценка остаточных напряжений, возникающих в литых чугунных и сварных стальных конструкциях. Разработаны технологические рекомендации по применению электромагнитной обработки и проектированию технологических процессов применительно к крупногабаритным корпусным деталям оборудования.

The article is devoted to method of impulse magnetic stabilization of assembly basic parts geometry. The state of surface coating after electromagnetic action was studied. Experimental estimate of residual voltages appearing in moulded cast iron and welded steel parts was performed. The authors worked out engineering guidelines for electromagnetic treatment and design of technological processes in the context of large-sized basic parts of equipment.

Ключевые слова: электромагнитная обработка, стабилизация формы, поверхностный слой.

Keywords: electromagnetic treatment, shape stabilization, surface coating.

Необходимость применения метода электромагнитной стабилизации

Чугунные литые и сварные сборные конструкции технологического оборудования под действием остаточных напряжений в поверхностном слое в процессе эксплуатации изменяют геометрические размеры и форму деталей даже в случае последующей механической обработки заготовок. В работах [3, 4] установлена возможность снижения остаточных напряжений путем импульсного электромагнитного воздействия, что способствует снижению и устранению коробления деталей, т.е. сохранению их точности, особенно крупногабаритных (оборудование, крупногабаритная оснастка, крупные детали основного производства).

Величина изменений формы и размеров деталей зависит от сочетания в них составляющих элементов, вида соединений, материалов, использованных в конструкции. Многие сборные изделия из высоколегированных сталей практически не изменяют геометрию после сварки, особенно при использовании защитных газов, диффузионных способов соединения частей. Однако такие методы требуют дорогостоящих средств оснащения процессов и применяются только для сборки ответственных узлов изделий. Наиболее употребительные виды сварки могут вызывать значительный перепад внутренних напряжений, действующих в течение длительного времени, поэтому необходима стабилизация их воздействий термическими и импульсными методами для повышения точности узлов, особенно при больших габаритах изделий.

Оценка остаточных напряжений

Исследования проводили на установке ЛЗ-107 в режиме работы единичными электромагнитными им-

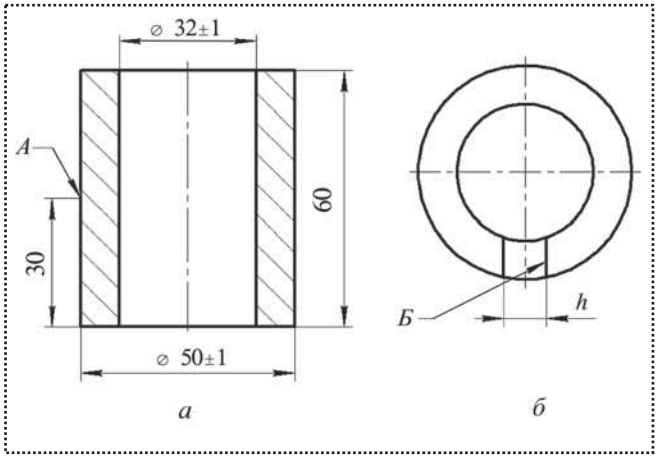


Рис. 1. Образцы из стали (*а*) и чугуна (*б*):
А – место сварки образцов; *Б* – место разрезки колец

пульсами. Использовались следующие параметры режима обработки:

- рабочий ток – 2,5...3 А;
- напряжение – 5...7 кВ;
- время импульса – около 1 с;
- емкость конденсаторов – 350...700 мкФ.

Образцы выполнялись из материалов: чугун СЧ 24, сталь Ст3, сталь 45, 30ХГСА, сталь 08Х15Н5Д2Т (ЭП 410).

Стальные образцы (рис. 1, *а*) для исследований имели цилиндрическую форму и могли состоять из нескольких элементов, соединенных сваркой. Число повторений эксперимента было не менее 6.

Чугунные образцы (рис. 1, *б*) выполнялись литьем в корковые формы. Внутреннюю поверхность обрабатывали чистовым точением. На внутренней поверхности удалялся припуск толщиной не менее 0,5 мм, в котором концентрируются остаточные напряжения. Это позволяет получить достоверную информацию об остаточных напряжениях в наружном слое при эксплуатации изделий.

Образцы из сталей сваривались, как показано на рис. 1.

У части образцов после сварки (см. рис. 1, *а*) место сварки зачищалось лезвийным инструментом, как снаружи, так и изнутри.

Остаточные напряжения оценивались по разнице диаметров, измеренных до магнитоимпульсной обработки и после нее при продольной разрезке образцов. Измерения каждого образца выполнялись в 18 сечениях с обоих торцов изделия. Далее путем пересчета осредненных результатов определялась разница в ширине паза *h* до действия электромагнитных импульсов и при известном количестве импульсов. Если паз *h* (см. рис. 1, *б*) уменьшается, то имеют место растягивающие остаточные напряжения; при расширении – сжимающие.

Целью электромагнитных воздействий является снижение величины остаточных напряжений, т.е. сохранение диаметра образцов после прорезки паза вдоль оси цилиндра. На рис. 2 показано изменение ширины паза *h* чугунных образцов после различного числа импульсов. Энергия импульса составляет около 12 кДж. Увеличение пазов показывает наличие внутренних напряжений сжатия, снижение этого размера – растягивающие воздействия. Анализ рис. 2 позволяет утверждать, что литые чугунные изделия в состоянии поставки имеют значительные напряжения растяжения, что нежелательно с позиций обеспечения прочностных показателей и поддержания стабильности формы в процессе эксплуатации.

Из опыта эксплуатации крупногабаритных шлифовальных станков известно, что литые станины из чугуна СЧ 24 без термообработки изменяли геометрию под действием внутренних напряжений до нескольких миллиметров при допуске на неплоскостность 0,02...0,03 мм. Это требовало частого ремонта направляющих элементов станины и заметно ухудшало потребительские показатели оборудования.

Электромагнитная импульсная обработка (см. рис. 2) интенсивно (после двух импульсов) снижает растягивающие напряжения (практически их устраняет), затем (после четырех импульсов) приводит к нарастанию напряжений сжатия, которые могут положительно влиять на прочностные свойства крупногабаритных литых деталей (особенно при многоцикловых силовых воздействиях). Кроме того, в период эксплуатации изделий происходит релаксация напряжений, что может компенсироваться поверхностными остаточными напряжениями сжатия.

Подобная же картина наблюдается (рис. 3) у сварных (электродуговой метод) сборных узлов из конст-

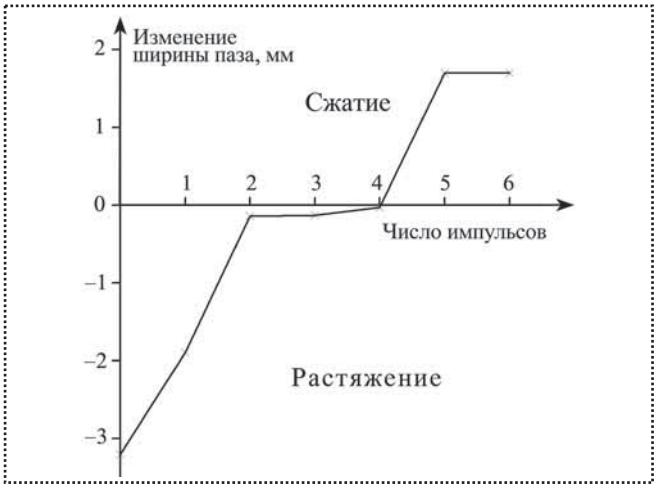


Рис. 2. Изменение ширины паза (остаточных напряжений) чугуна в процессе воздействия электромагнитных импульсов

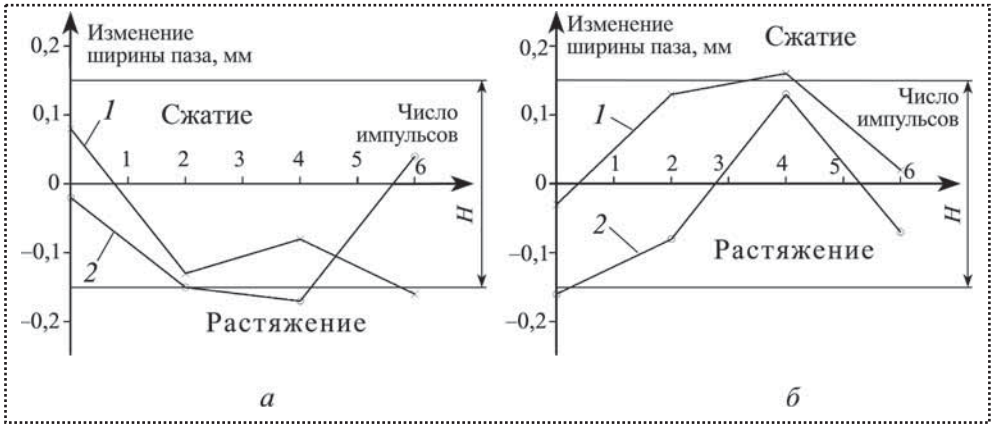


Рис. 3. Изменение ширины паза сталей 3 (*а*) и 45 (*б*) в процессе обработки:
1 – энергия импульса 6 кДж; *2* – энергия импульса 12 кДж

рукционных сталей. Здесь имеют место значительные растягивающие напряжения, особенно у стали 45 (рис. 3, *б*), где после электродуговой сварки напряжения в поверхностном слое в 3 раза превышают аналогичные показатели для стали 3 (см. рис. 3, *а*). После 3–4 электромагнитных импульсов с энергией 12 кДж остаточные напряжения снижаются до пределов погрешности измерений и не нарастают даже после 6 импульсов, что наблюдалось для чугуна (см. рис. 2). Следовательно, число импульсов, необходимых для снижения напряжений и стабилизации геометрии сварных изделий, можно ограничить 5–6 (при энергии импульса 10...15 кДж) или снизить энергию единичного импульса в 1,5–2 раза.

Легированные сплавы типа 30ХГСА и 08Х15Н5Д2Т (ЭП 410) после аргонодуговой сварки вольфрамовым электродом не имеют существенных изменений остаточных напряжений (рис. 4).

Многократные (не менее 15 раз) измерения ширины паза показали, что рассеивание размеров *h* составляет около ± 0,15 мм. Результаты, приведенные на рис. 4, показывают, что с учетом рассеивания не наблюдается заметных изменений остаточных напряжений в деталях из легированных сплавов после сварки в среде аргона, поэтому стабилизирующие операции (в том числе электромагнитная импульсная обработка) не требуются.

Технологические рекомендации по применению электромагнитной обработки

Анализ рис. 2 и 3 показывает, что число импульсов, требуемых для стабилизации внутренних напряжений в крупногабаритных деталях из чугуна или из конструкционных сталей можно существенно снизить, что даст возможность удешевить и ускорить энергоемкую операцию магнитоимпульсной обработки. Так, для литых чугунных корпусных станин, стоек, столов станков можно при малой толщине (до 20 мм) заготовки ограничить число импульсов до 3, что сократит машинное время до 2 мин вместо ранее затрачиваемых 20 мин. При толщине заготовки более 20 мм и сложной пространственной форме число импульсов может быть увеличено в 2–2,5 раза. Но и здесь имеет место значительное (по сравнению с рекомендованным в работе [4]) уменьшение времени протекания процесса.

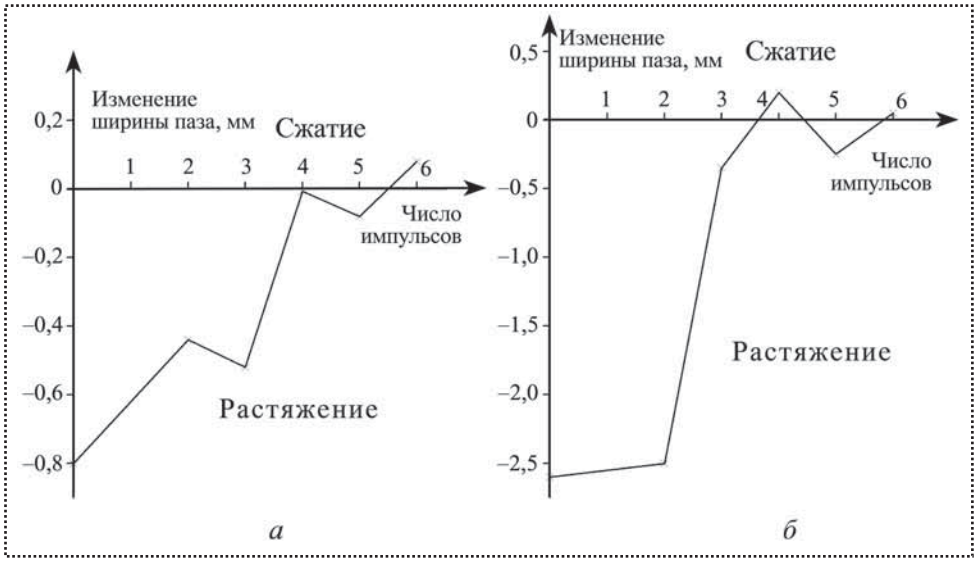


Рис. 4. Изменение ширины паза, характеризующее величину остаточных напряжений, для сталей 30ХГСА (*а*) и 08Х15Н5Д2Т (ЭП410) (*б*) в процессе электромагнитной обработки

Для сварных сборных изделий из конструкционных сталей целесообразно использовать (см. рис. 3) электромагнитную стабилизацию с числом импульсов 3–4 (для деталей толщиной до 15 мм). Для более толстых деталей со сложной пространственной геометрией число импульсов возрастает в 2–3 раза. В любом случае такая операция выполняется быстрее, чем ранее, где

излишние импульсные воздействия могли создать значительные сжимающие напряжения, вызывающие коробление, особенно крупногабаритных деталей, в частности деталей оборудования. Видимо, недостаточное количество известных исследований по назначению режимов электромагнитной стабилизации стало причиной ограниченного применения в станкостроении экономически целесообразного технологического процесса электроимпульсной обработки.

Для легированных сплавов (см. рис. 4) нет необходимости включать в технологический процесс операции по стабилизации геометрии сварных деталей. Здесь при сварке образцов в среде аргона и электромагнитной обработке их до 6 импульсов с энергией 12 кДж ширина паза (*h* на рис. 1, *б*), характеризующая величину остаточных напряжений, практически не меняется, так как при различной энергии импульса рассеивание результатов измерения находится в диапазоне ("Н" на рис. 3) точности измерений (± 0,15 мм). При этом для стали 30ХГСА (см. рис. 4, *а*) незначительные растягивающие напряжения наблюдаются практически при любом числе импульсов, а у стали 08Х15Н5Д2Т (ЭП 410) – (см. рис. 4, *б*) в рабочей зоне действия импульсов (3–4 импульса) имеют место стабильные (хотя и незначительные) сжимающие напряжения.

Если сварка выполняется на воздухе электродуговым методом, то наблюдаются значительные растягивающие напряжения и электромагнитная импульсная обработка (даже с энергией импульса менее 6...8 кДж) позволяет снизить их величину до приемлемых значений после 3–6 импульсов.

Поверхностный слой материалов после электромагнитной обработки

С учетом условий эксплуатации изделий из всех рассмотренных материалов необходимо проанализировать изменения структуры поверхностного слоя, определяющего работоспособность устройств, особенно в наукоемких объектах. Изменение свойств материалов определяет область использования наукоемких технологий в высоконагруженных изделиях. Проведенные металлографические исследования литых и сборных сварных образцов показали значительное влияние на структуру слоя метода получения

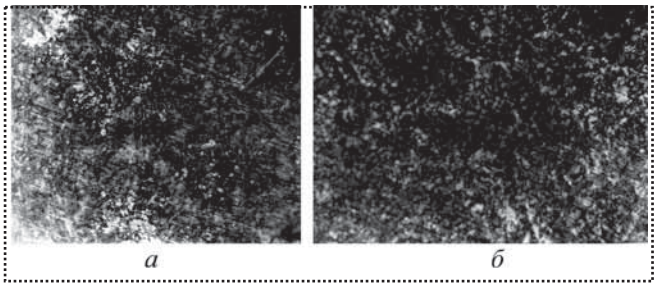


Рис. 5. Микроструктура чугунного образца (×100):
а – в состоянии поставки; *б* – после электромагнитной обработки четырьмя импульсами с энергией 6 кДж

заготовок и импульсных электромагнитных воздействий.

На рис. 5 показана микроструктура чугунного шлифа (СЧ 24) в состоянии поставки материала (*а*) и после стабилизации (*б*) четырьмя импульсами.

Из анализа рис. 5 видно, что структура шлифов *а* и *б* идентична. Это перлит с незначительным содержанием феррита и включениями пластинчатого графита. Следовательно, электромагнитное воздействие стабилизировало структуру чугуна, что подтверждает данные, приведенные при анализе рис. 2.

Для конструкционных сталей (рис. 6) после шести импульсов структура материала становится близкой к исходному (до сварки) состоянию. Здесь наблюдается в основном ферритно-перлитная структура.

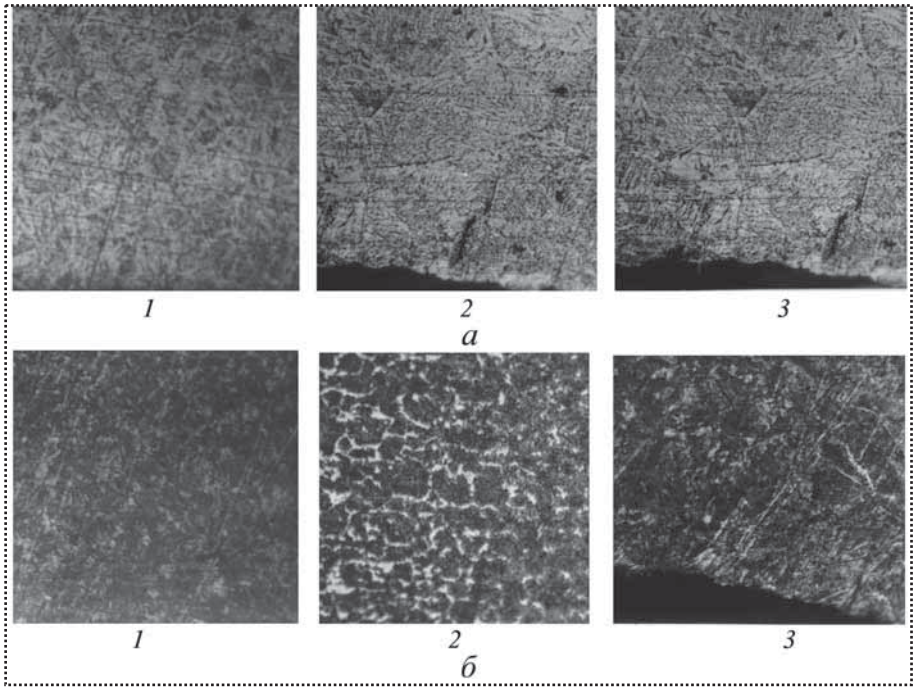


Рис. 6. Микроструктура сталей Ст3 и 45 (×100):
а – Ст3; *б* – сталь 45; *1* – в состоянии поставки; *2* – после сварки; *3* – после обработки шестью импульсами с энергией 12 кДж

Исходный материал *1* (Ст3) на рис. 6, *а* и такой же образец *3* после воздействия 6 импульсов (рис. 6, *а*) имеют практически одинаковую структуру. После электродуговой сварки (рис. 6, *а*) наблюдается крупнозернистая структура *2*, что указывает на неравновесное состояние материала и возможность его деформации. Анализ образцов *1, 3* рис. 6, *а* подтверждает, что электромагнитная обработка шестью импульсами с энергией 12 кДж приводит к стабилизации структуры материала.

Аналогичные результаты получены для стали 45 (рис. 6, *б*), где импульсная обработка на тех же режимах приводит к стабилизации структуры (образцы *1*, *3*), хотя после сварки в образце *2* (рис. 6, *б*) наблюдается крупнозернистый перлит и выделение углерода по границам феррита. Последнее не способствует получению устойчивой структуры, необходимой для изделий, используемых в крупногабаритных сварных конструкциях.

Исследования, проведенные для рассматриваемых материалов при числе импульсов 4–6 и энергии импульса 6...12 кДж, показали, что электромагнитная стабилизация позволяет успешно заменить для крупногабаритных деталей (корпусных элементов оборудования, оснастки) дорогостоящую энергоемкую термическую операцию стабилизации геометрии изделий на локальную импульсную обработку, которая не требует громоздкого оборудования и длительного процесса стабилизации формы изделия.

Выводы

1. После электромагнитных импульсных воздействий уровень остаточных напряжений в чугунных литых и в большинстве стальных сварных изделий значительно снижается, и могут возникать желаемые сжимающие напряжения.

2. Величина остаточных напряжений после обработки зависит от энергии и числа импульсов, которое, как правило, даже для крупногабаритных изделий не превышает шести. Дальнейшее увеличение числа импульсов нецелесообразно, так как это требует необоснованного расхода энергии и дополнительных трудозатрат.

3. В процессе электромагнитной импульсной обработки происходит активное выравнивание микроструктуры, что представляет практический интерес при изготовлении корпусных деталей оборудования и других крупногабаритных изделий из чугуна и конструкционных сталей.

4. Электромагнитные импульсы практически не изменяют характеристики поверхностного слоя легированных сталей после применения специальных видов сварки (например, в защитных газах), поэтому электромагнитная обработка здесь не требуется. Однако при использовании электродуговой и кислородоацетиленовой сварки электромагнитная импульсная обработка заметно снижает остаточные напряжения и в некоторых случаях может применяться для стабилизации геометрии сварных крупногабаритных изделий.

Библиографический список

1. **Печагин А.П., Смоленцев В.П., Найденов А.И.** Повышение точности сборных корпусных деталей путем искусственного старения методом магнитоимпульсной обработки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2009. № 6. С. 41–46.

2. **Печагин А.П., Смоленцев В.П., Питолин В.М.** Разработка технологического процесса магнитоимпульсной стабилизации размеров корпусных деталей // Известия Орел-ГТУ. 2008. № 4/4-272. С. 39–47.

3. **Смоленцев Е.В.** Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.

4. **Электрофизические** и электрохимические методы обработки материалов. В 2 т. Т. 2 / Под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высшая школа, 1983. 208 с.

УДК 519.85

Ю.Н. Матросова, М.В. Федотов, *канд-ты техн. наук*
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: kandy2701@mail.ru

Моделирование устройства для автоматизированной сборки изделий*

Представлено разработанное авторами программное обеспечение для автоматизированного расчета конструктивных параметров завинчивающего устройства и построения его трехмерной модели.

Presented by the authors developed software for the automated calculation of design parameters of a screw device and construction of its three-dimensional model.

Ключевые слова: программное обеспечение, завинчивающее устройство, податливое крепление, сборка.

Keywords: software, screw device, screw device, pliable mount, assembly.

В машино- и приборостроении идет активное внедрение информационных технологий в производство для автоматизации сборки, механической обработки и других производственных процессов. Поэтому задача, связанная с моделированием завинчивающих устройств и автоматизацией расчета их параметров, является актуальной.

При сборке резьбовых и цилиндрических соединений с гарантированным зазором для автоматизированной доориентации соединяемых деталей применяют способ пассивной адаптации. Его выполняют при одновременном соблюдении трех условий:

- силового взаимодействия соединяемых деталей;
- податливости одной из деталей;
- вращения одной из деталей.

Авторами разработана схема устройства совмещения соединяемых деталей. Конструктивное решение податливого крепления завинчивающего устройства к плите исполнительного органа сборочного оборудования представлено на рис. 1. Завинчивающее устройство *6* крепится к плите исполнительного органа (держателю) *4* болтами *7*, проходящими через эту плиту с зазором и через фланец устройства *6*. Завинчивающее устройство поджато пружиной *5*. Шпиндель *8* соединен штифтом с патроном *2* для удерживания соединяемой детали (шпильки) *1* и поджат пружиной *3* для обеспечения подачи детали в процессе сборки с узлом *9*.

* Работа выполнена в рамках реализации государственного контракта № 14.740.11.0984.

Процесс проектирования податливого крепления довольно громоздкий, поэтому целесообразно проводить автоматизированный расчет параметров его элементов.

Рассмотрим **условия собираемости сборочного узла.**

Условия для процесса поиска (относительное совмещение осей соединяемых деталей):

- закон прецессионного движения устройства вращения:

$$\psi = \omega t,$$

где ψ – угол прецессии (угол поворота корпуса устройства вращения вокруг оси *OZ*);

ω – угловая скорость вращения шпинделя *8* вокруг оси *OZ*;

t – время;

- закон нутационного движения:

$$\theta = f(\varphi, v, G, G_1, a, a_1, b, c_1, c_2, l, l_2, k_1, k_2, I_1, t);$$

$$\theta_{max}(b + a - a_2) = \frac{c_v B}{c_v A} Vt \le \frac{2}{3} d_2,$$

где θ – угол прецессии (угол поворота корпуса устройства вращения вокруг оси *OZ*);

φ – угол собственного вращения шпинделя вокруг оси Z_1;

v – скорость подвода плиты исполнительного органа;

G – сила тяжести устройства вращения;

G_1 – сила тяжести патрона вместе с соединяемой деталью;

a – длина пружины податливого крепления в свободном состоянии;

a_1 – предварительное поджатие пружины патрона;

b – расстояние от плиты держателя до конца детали, удерживаемой в патроне в свободном состоянии;

c_1 – линейная жесткость пружины патрона;

c_2 – линейная жесткость пружины податливого крепления;

l – длина корпуса устройства вращения;

l_2 – длина патрона вместе с соединяемой деталью;

k_1 – угловая жесткость пружины патрона;

k_2 – угловая жесткость пружины завинчивания устройства в начальный момент времени;

I_1 – момент инерции устройства вращения относительно оси OX_1;

t – время процесса сборки;

θ_{max} – угол нутации (наклона оси устройства вращения по отношению к оси отверстия);

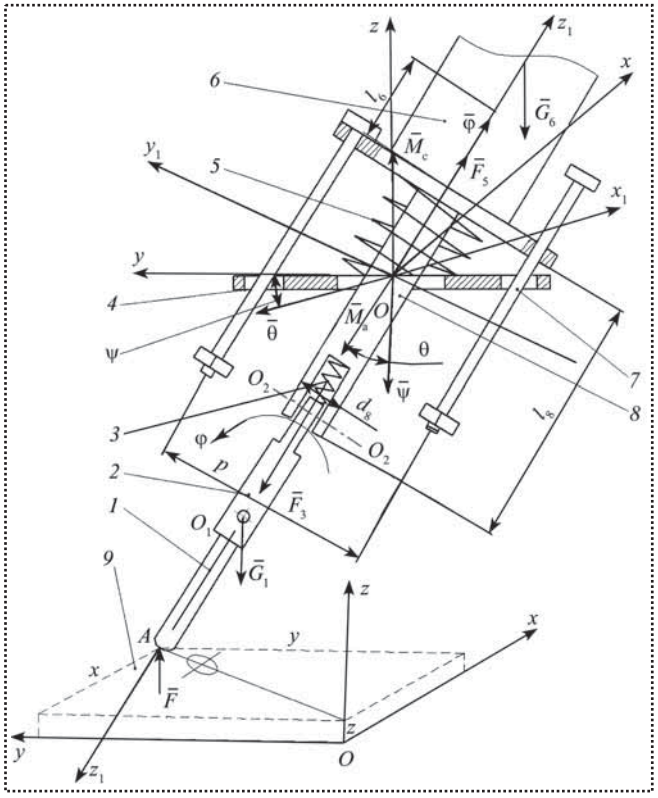


Рис. 1. Кинематическая схема устройства:
1 – соединяемая деталь (шпилька); *2* – патрон; *3* – пружина патрона; *4* – плита исполнительного органа сборочного оборудования (держатель); *5* – пружина податливого крепления (упругий подвес); *6* – устройство вращения (завинчивающее устройство); *7* – болты; *8* – шпиндель; *9* – узел; *Oxyz* – неподвижная система координат, связанная с собираемым узлом *9*; $Ox_1y_1z_1$ – подвижная система координат, жестко связанная с корпусом устройства вращения; *F* – равнодействующая давления детали на поверхность узла; F_3 – сила упругости пружины *3*; F_5 – сила упругости пружины *5*; φ – угол собственного вращения шпинделя вокруг оси z_1; θ – угол прецессии (угол поворота корпуса устройства вращения вокруг оси *Oz*); ψ – угол нутации (угол поворота корпуса устройства вращения вокруг оси Ox_1); $\dot{\varphi}$ – вектор угловой скорости собственного вращения (направлен по оси вращения); $\dot{\theta}$ – вектор угловой скорости прецессионного движения; $\dot{\Psi}$ – вектор угловой скорости нутационного движения; *A* – точка контакта детали и собираемого узла; O_1 – точка приложения силы тяжести G_1 патрона; O_2–O_2 – ось шпильки, крепящей шпиндель устройства вращения к патрону; $\overline{M}_a$ – вектор активного момента вращения на шпинделе устройства вращения (вектор крутящего момента); $\overline{M}_c$ – вектор момента сопротивления вращению; l_6 – положение центра тяжести завинчивающего устройства относительно его фланца; l_8, d_8 – длина и диаметр шпинделя *8* соответственно; G_6 – масса устройства вращения *6*; *p* – расстояние между крепежными отверстиями на фланце

$\theta_{max}(b + a - a_2)$ – длина дуги поворота конца цилиндрической детали относительно фланца устройства вращения;

c_vA – расстояние от мгновенного центра скоростей до оси штифта крепления патрона к шпинделю завинчивающего устройства;

c_vB – расстояние от мгновенного центра скоростей до точки касания цилиндрической детали плоскости узла;

d_2 – диаметр отверстия.

Условия невыхода конца цилиндрической детали из зоны отверстия:

$$\frac{\pi}{4} \le \alpha \le \frac{3}{4}\pi;$$

$$\omega \le \frac{\left[b_1 + \left(\frac{g}{k^2} + a_1\right)\cos\theta\right]k}{(l_1 + l_2)\sin\theta\cos^2\theta\cos 2\alpha\sin\beta},$$

где α – угол, определяющий след скольжения шпильки по плоскости узла внутри отверстия;

b_1 – высота фаски отверстия;

g – ускорение свободного падения;

a_1 – предварительное поджатие пружины патрона;

k – частота собственных колебаний системы патрон – цилиндрическая деталь вдоль оси шпинделя устройства вращения;

θ – угол прецессии (угол поворота корпуса устройства вращения вокруг оси *OZ*);

l_1 – длина шпинделя устройства вращения между патроном и плитой держателя;

l_2 – длина цилиндрической детали и патрона;

β – угол фаски отверстия.

Условия углового совмещения осей соединяемых деталей:

$$\theta_{1\,min}(t) - \operatorname{arctg}\frac{\Delta}{l_3} \le \gamma,$$

где θ_{1min} – минимальный угол перекоса осей отверстия и шпинделя;

Δ – величина зазора в сопряжении шпиндель – патрон;

l_3 – длина взаимодействия патрона и шпинделя в сопряжении;

γ – угол перекоса, определяемый условиями собираемости;

$$\theta_1 = f(\varphi, v, G, G_1, a, a_2, b, l, l_2, k_1, k_2, I_1, t),$$

где θ_1 – угол перекоса осей шпинделя устройства вращения и отверстия;

a_2 – предварительно поджатие пружины податливого крепления.

Задавшись величиной относительного смещения осей соединяемых деталей, диаметром цилиндрической детали и длиной патрона с цилиндрической деталью, выполняем расчет податливого крепления устройства вращения и режимов работы сборочного оборудования по следующей методике:

1) определяем предельный угол перекоса осей шпинделя устройства вращения и отверстия в сборочном оборудовании;

2) предварительно выбираем и определяем параметры имеющегося в наличии устройства вращения;

3) выбираем параметры пружины патрона и пружины податливого крепления устройства, исходя из принятых ограничений;

4) рассчитываем линейную скорость опускания плиты держателя исполнительного органа сборочного оборудова-

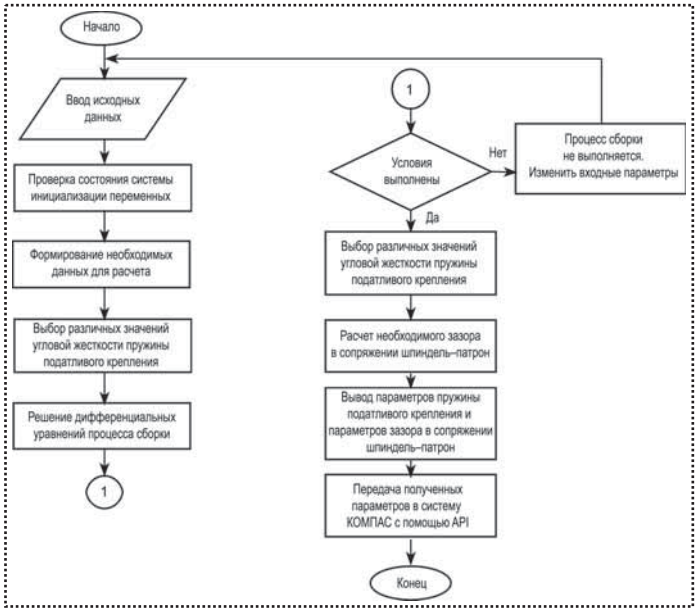


Рис. 2. Алгоритм работы программы

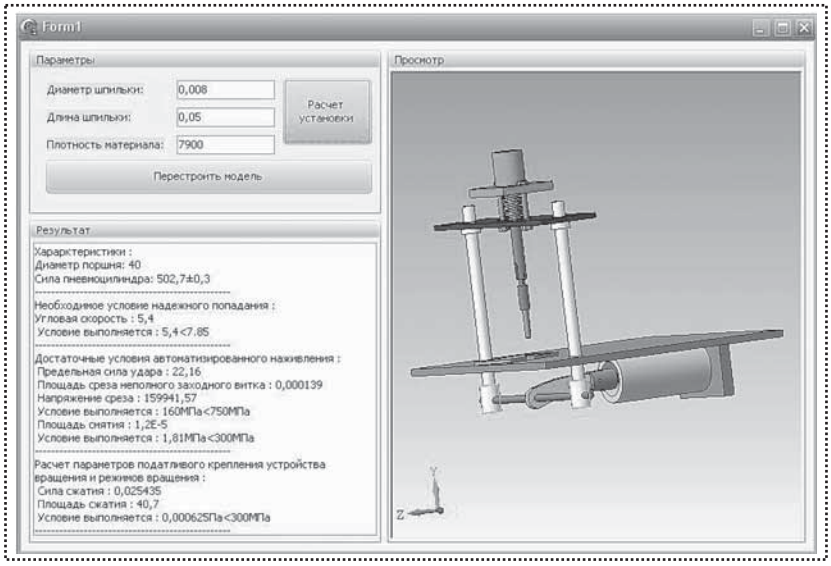


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения

ния. Согласно полученным ограничениям и условиям собираемости, определяющим шаг спирали Архимеда, принимаем линейную скорость опускания плиты держателя исполнительного органа сборочного оборудования v = = 0,01 м/с;

5) решаем дифференциальное уравнение нутационного движения корпуса устройства вращения на ЭВМ при помощи программы Borland Delphi7 и выбираем значение угловой жесткости пружины подвеса устройства вращения, при которой произойдет автоматизированная доориентация и сборка соединяемых деталей. В случае если условия собираемости не выполняются, то в сопряжение шпиндель–патрон необходимо ввести минимальный зазор;

6) определяем расчетное значение радиуса пружины подвеса устройства вращения;

7) в зависимости от полученного ограничения радиуса пружины подвеса, имеющихся в наличии пружин, габаритов и конструкции устройства вращения принимаем наружный диаметр пружины подвеса.

Рассчитываем диаметр проволоки пружины подвеса устройства вращения при выбранном диаметре пружины $D_{\text{пр}}$.

Приведенная последовательность расчета заложена в алгоритм работы программного обеспечения (рис. 2), которое производит расчет параметров податливого крепления, а также конструктивных параметров завинчивающего устройства и построение его трехмерной модели с визуализацией его функционирования (рис. 3). В случае изменения исходных данных происходит перерасчет характеристик устройства и перестройка его трехмерной модели, что позволяет выбрать оптимальный вариант работы сборочного оборудования.

Вывод

Разработаны методика и программное обеспечение для расчета параметров податливого крепления устройства вращения и моделирования режимов работы сборочного оборудования.

Библиографический список

1. **Белоусов А.П.** Проектирование станочных приспособлений: учеб. пособие для техникумов. Изд. 2-е. М.: Высшая школа, 1974. 410 с.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".
Адрес электронной почты издательства: **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 19.04.12 г. Подписано в печать 08.06.12 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,18. Заказ 263. 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.