

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

1 2013
(150)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Коптев И.И., Смоленцев В.П., Смоленцев Е.В., Салтанаева Е.А. Изготовление и комплектация форсунок для подачи горючих смесей 3

Современные технологии сборки

Божкова Л.В., Вартапов М.В., Мартынович Н.А. Математическая модель динамики сопряжения деталей с применением промышленного робота и вибрационного устройства 12

Абрамов А.И., Абрамов И.В., Романов А.В. Научно-технические аспекты автоматизации гидропрессовой сборки соединения с натягом 16

Иванов А.А. Промышленные роботы в сборочном производстве 19

Магдиев Р.Р. Опыт построения моделей технологической системы механосборочного оптико-электронного мелкосерийного производства 23

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Костюков В.Н., Костюков А.В., Щелканов А.В. Стеновая система ультразвукового контроля вкладышей подшипников скольжения КОМПАКС-УЗД 26

Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Определение вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий типа "вал-втулка" при выборе селективных интервалов 29

Фомин А.А. Влияние дополнительной опоры заготовки в зоне резания на устойчивость процесса обработки 34

Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Совершенствование методов виброиспытаний с применением вибростендов 40

Информация

Указатель статей, опубликованных в 2012 году 45

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД	Г.А. ХАРЛАМОВ
Н.А. ПЕЛИПЕНКО	
БРЯНСК	А.Н. ПОЛЯКОВ
О.А. ГОРЛЕНКО	А.И. СЕРДЮК
ВЛАДИВОСТОК	А.П. ФОТ
Ю.Н. КУЛЬЧИН	РЫБИНСК
А.А. СУПОНЯ	В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
В.М. КОРНИЕНКО	В.В. НЕПОМИЛУЕВ
ВОЛГОГРАД	А.Н. СЕМЕНОВ
В.Г. КАРАБАНЬ	САМАРА
М.Г. КРИСТАЛЬ	М.А. ЕВДОКИМОВ
В.И. ЛЫСАК	Ю.А. ВАШУКОВ
В.М. ТРУХАНОВ	Г.А. КУЛАКОВ
ИЖЕВСК	В.А. НИКОЛАЕВ
И.В. АБРАМОВ	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
Б.А. ЯКИМОВИЧ	В.Ф. КУЗЬМИН
В.Г. ОСЕТРОВ	Е.В. ШАЛОБАЕВ
КАЗАНЬ	ТОЛЬЯТТИ
Р.И. АДГАМОВ	А.И. РЫЖКОВ
КОВРОВ	ТУЛА
Ю.З. ЖИТНИКОВ	В.В. ПРЕЙС
КОЛОМНА	ХАБАРОВСК
Ю.Д. АМИРОВ	В.А. ЛАШКО
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	

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 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.

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

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

1 2013
(150)

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Koptev I.I., Smpentsev V.P., Saltanaeva E.A., Smolentsev E.V. Manufacturing and complete equipment of atomizers for feeding of combustible mixtures 3

Modern technologies in assembly

Bozhkova L.V., Vartanov M.V., Martynovich N.A. Mathematical model of dynamics of interface of details with use of the industrial robot and the vibrating device 12

Abramov A.I., Abramov I.V., Romanov A.V. Scientific-technical aspects of interference fit hydro-press assembling automation 16

Ivanov A.A. Industrial robots in assembling production. 19

Magdiev R.R. An experience of technological system modeling of electronic-optical assembly in a small branch production 23

Quality assurance. Testing. Monitoring

Kostyukov V.N., Kostyukov A.I.V., Schelkanov A.V. Stend system of plain bearing liners Ultrasonic control COMPACS-UZD 26

Sorokin M.N., Anurov Yu.N. Definition of probability of reception of the rejected interfaces at selective assemblage of products of type "shaft-plug" on the valid values of interfaced parameters 29

Fomin A.A. The slab additional support influence in the cutting zone on a stability of the mechanical process 34

Chelpanov I.B., Kochetkov A.V. Perfection of methods of vibrating tests with application of vibrating stands 40

Information

Index of articles published in 2012. 45

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

VOVGORAD

M.G. KRISTAL
V.G. KARABAN'
V.I. LYSAK
V.M. TRUKHANOV

IZNEVSK

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

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.

УДК 621.9.047

И.И. Коптев, аспирант, **В.П. Смоленцев**, **Е.В. Смоленцев**, д-ра техн. наук
(Воронежский государственный технический университет),
Е.А. Салтанаева, аспирант (Казанский государственный энергетический университет)
E-mail: smol@comch.ru

Изготовление и комплектация форсунок для подачи горючих смесей

Проведен анализ технологичности типовых каналов для подачи горючих смесей через форсунки, используемые в тепловых двигателях и энергетических устройствах. Рассмотрены особенности изготовления каналов в форсунках с учетом их размещения в зоне горения смесей и места установки в изделиях.

This article shows analysis of manufacturability of typical channels for feeding of combustible mixtures through atomizers, using in thermal engines and power plants. Manufacturing features of channels in atomizers depending of its placement in mixtures combustion zone and location in assembly is also shown.

Ключевые слова: pulverизатор, производство, оборудование, новые технологии.

Keywords: atomizer, manufacturing, equipment, new technologies.

Конструкции форсунок. Форсунки для подачи горючих смесей работают в условиях больших перепадов давления, температуры, воздействия химически активных газообразных, жидких и твердых компонентов. Нередко на одном техническом устройстве используют несколько видов форсунок, различных по конструкции, расходу и распылу рабочей среды.

Типовые конструкции форсунок приведены на рис. 1. Наибольшее использование в установках для горения нашли осевые струйные форсунки, которые могут иметь одно (рис. 1, а) или несколько сопел, разделенных рассекателями (D на рис. 1, а) потока (как правило радиальными перемычками). Таких перемычек может быть от 2 до 6. Иногда струи формируются системой круглых отверстий с параллельными осями. Известны попытки выполнения сопел с некруглой (овальной B , эллипсной, многогранной C) формой сечений.

Распыл струи зависит от изменения площади сечения сопла по длине. Показанный на рис. 1, б конфузорный профиль сопла 2 создает более концентриро-

ванный поток горючей смеси, используемый в горелках для разделения материалов. Диффузорный или иной подобный профиль улучшает распыл топлива, что расширяет технологические возможности форсунок в тепловых двигателях.

Форсунки имеют ограниченный ресурс, поэтому, как правило, предусматривают возможность их быстрой замены. Сборная конструкция из корпуса 1 и накидной гайки показана на рис. 1, в. При этом сопло может иметь любую форму сечения, в том числе из числа приведенных на рис. 1, а.

Для увеличения степени распыла используют однорядные (рис. 1, г) и многорядные форсунки с соплами различного по площади и форме сечения. Это позволяет создавать множество вариантов комплектации огневых камер ракетных двигателей в процессе их сборки. В случае использования многоструйных форсунок (рис. 1, г и д), особенно с несколькими рядами сопел, при постоянном расходе топлива через форсунку площадь сечения каждого отверстия снижается, что усложняет технологию их получения и комплектацию агрегатов при сборке. Еще большие затруднения при обработке сопел вызывает изготовление тангенциальных каналов с сечением до $0,2 \text{ мм}^2$, где традиционное сверление становится неэффективным и ограничивает разработчика возможностью проектирования только круглых цилиндрических отверстий. Здесь требуются новые наукоемкие технологии типа электроэрозионной, электрохимической и комбинированной обработки.

Осевые центробежные форсунки (рис. 1, е) могут содержать шнековые элементы 7 с постоянным и переменным шагом винтовых каналов, что создает закрутку потока горючей смеси в сопле 2. Кроме того, наличие шнека позволяет смешивать перед соплом компоненты топлива.

В ракетных двигателях могут применять многокомпонентные форсунки (рис. 1, ж), в которых шнековый смеситель 9 является обязательным элементом и служит в основном для эффективного смешивания двух и более компонентов топлива. Имеются [1] конструкции форсунок, в которых изменение расхода

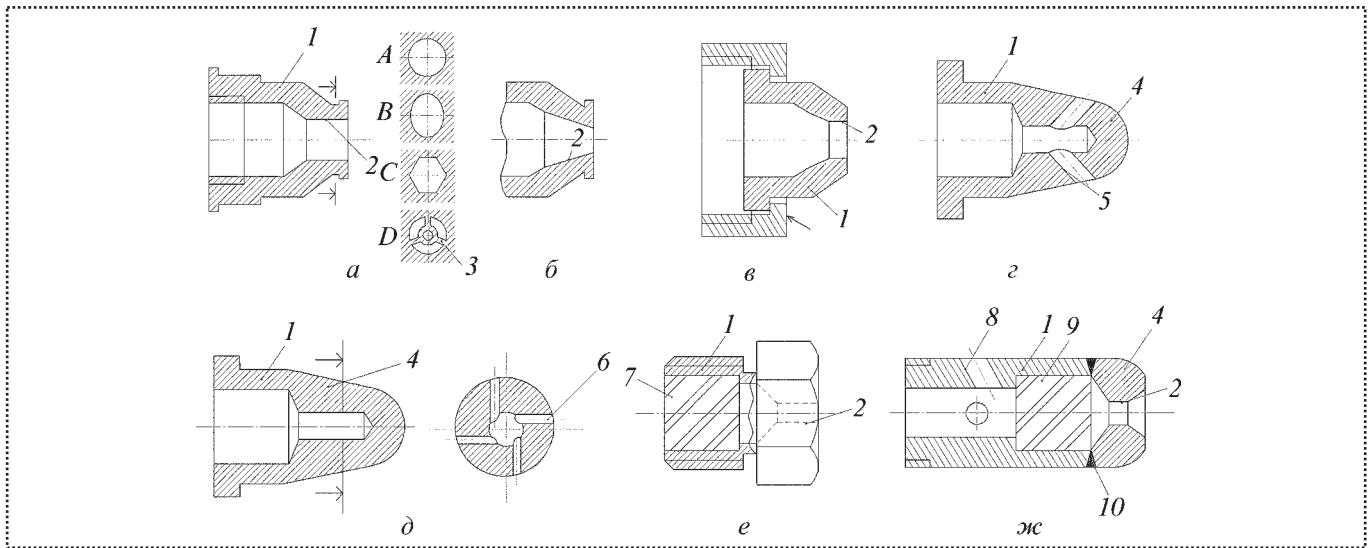


Рис. 1. Форсунки для подачи горячих смесей:

а – осевая одноструйная монолитная с соплом постоянного по длине сечения: *A* – круглым; *B* – эллиптическим; *C* – многогранным; *D* – с рассекателями потока (перемычками); *б* – осевая одноструйная монолитная с соплом переменного сечения; *в* – сборная одноструйная разъемная; *г* – многоструйная с однорядными отверстиями; *д* – центробежная с тангенциальными отверстиями; *е* – центробежная со шнеком; *ж* – осевая одноструйная сборная неразъемная многокомпонентная со шнековым смесителем; *1* – корпус форсунки; *2* – сопло; *3* – рассекатели потока (перемычки); *4* – обтекатель корпуса; *5* – отверстие; *6* – тангенциальное отверстие; *7* – шнек; *8* – канал для подачи второго компонента; *9* – шнековый смеситель; *10* – место соединения обтекателя с корпусом форсунки

компонентов топлива достигается, например, уменьшением диаметра отверстий δ (рис. 1, *ж*).

В тепловых двигателях используют сопла форсунок из жаропрочных сплавов на базе железа и цветных материалов с высоким теплопроводом (бронза и др.), из минерало- и металлокерамики, получаемых из порошка и гранул, а также различных композитов.

К форсункам предъявляют высокие требования по точности проточной части сопла (2–5 квалитет), шеро-

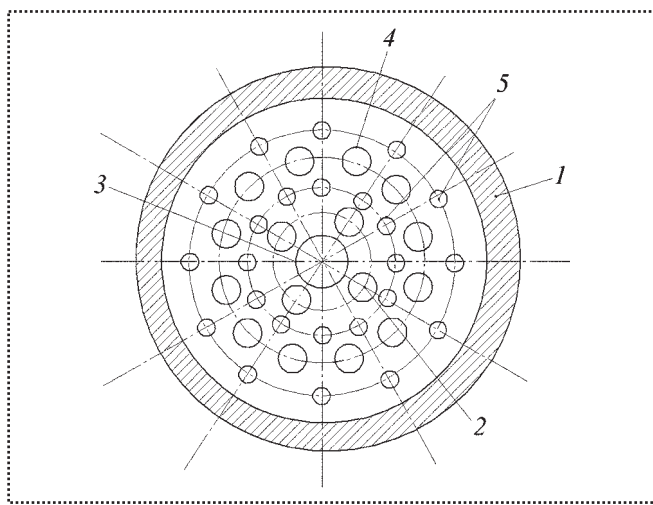


Рис. 2. Огневое днище ракетного двигателя с форсунками:

1 – корпус; *2, 3, 4, 5* – форсунки с различными техническими характеристиками для подачи горячих смесей

ховатости ($Ra = 1,25 \dots 0,63$ мкм). У сборочных элементов погрешность допускается не более 0,03 мм, что должно обеспечивать стабильный расход компонентов и распыл топлива. Как показано в работе [2], форсунки работают в условиях широкого изменения параметров (до 105 %), в том числе при давлении компонентов горячих смесей до 80 МПа, что следует учитывать при проектировании технологических процессов обработки и сборки форсунок и огневых днищ двигателей (рис. 2).

Как показано в работе [1] в огневом днище (рис. 2) может быть скомплектовано несколько объединенных коллекторами видов форсунок, имеющих различные расходные характеристики и углы подачи компонентов топлива. В данной работе рекомендовано комплектовать форсунки так, чтобы массовый расход горячего при работе двигателя отличался между соседними группами в пределах огневого днища в диапазоне 3...10 %. Здесь учитывают необходимость устранения высокочастотных колебаний изделий, для чего форсунки различных групп располагают по спирали, что оказывает влияние на их комплектацию при сборке, расходные характеристики при изготовлении сопел.

Упрощенный вариант огневого днища представляет форсажный коллектор реактивного двигателя (рис. 3).

Как правило, в коллекторах применяют одинаковые форсунки, что облегчает процесс комплектации узла и его сборки. Однако изготовление большого

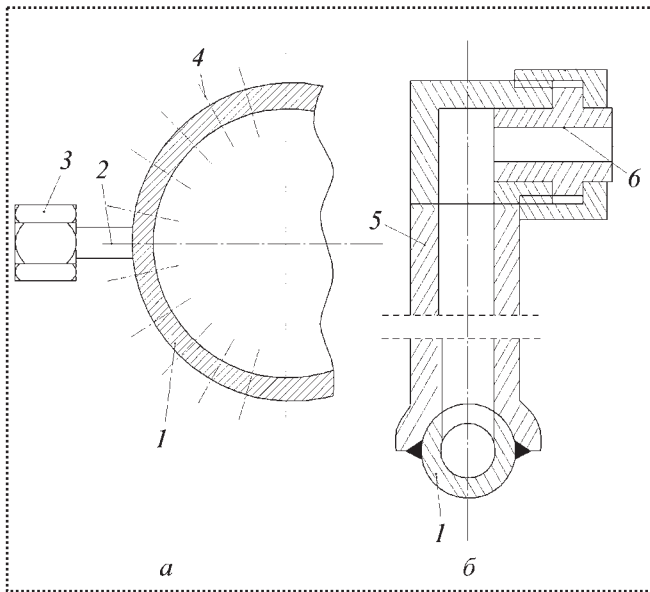


Рис. 3. Схема форсажного коллектора:

a – общий вид; *б* – разрез по форсунке; 1 – кольцевая труба; 2 – патрубок подвода топлива с накидной гайкой; 3, 4 – форсунка; 5 – корпус форсунки с накидной гайкой; 6 – сопло форсунки

числа отверстий в трубе 1 вызывает технологические сложности, которые удастся преодолеть при использовании нетрадиционных процессов: электрохимической, электроэрозионной или наиболее эффективной комбинированной эрозионно-химической обработки.

Новые технологические процессы изготовления форсунок. Для случая, приведенного на рис. 3, наиболее эффективным оказался процесс эрозионно-химической прошивки отверстий, позволяющий поднять скорость образования каналов в тонкостенной трубе 1 до 20 мм/мин. При этом формируется скругление на кромке отверстия и исключается возможность появления заусенцев, представляющих наибольшую опасность для проточного тракта сопла 6.

Аналогичная проблема возникает в местах сопряжения отверстий (см. рис. 1, *г* и *д*), где доступ к кромкам со стороны центрального отверстия ограничен малым диаметром и большим углублением в корпус 1 форсунки.

Известен эффективный способ (рис. 4) комбинированного удаления заусенцев электродом-щеткой.

Для снятия заусенцев 3 в месте стыковки сопла 2 с центральным отверстием форсунки внутрь последнего вводится электрод-щетка, состоящая из металлической трубки 6 с закрепленными на конце пучками проволоки 4 из упругого материала (например, латуни). На трубку 6 надета подвижная втулка 5, сжимающая проволоку 4 так, чтобы электрод мог свободно

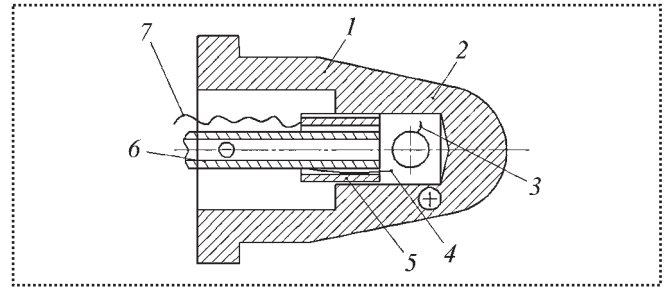


Рис. 4. Удаление заусенцев электродом-щеткой:

1 – корпус форсунки; 2 – сопло; 3 – заусенец; 4 – проволока электрода-щеточки; 5 – подвижная втулка; 6 – металлическая трубка; 7 – гибкая тяга

войти в центральное отверстие до места нахождения заусенцев 3. Затем втулку 5 перемещают вдоль оси трубки 6 до освобождения проволоки 4, которая под действием упругих сил выпрямляется и образует кольцевую щетку. Подключают трубку 6 и корпус 1 форсунки к низковольтному источнику постоянного тока, через трубку 6 подают электролит, включают вращение детали или электрода-щеточки. За счет анодного растворения металла удаляют заусенцы 3 и одновременно скругляют кромки в сопле на границе с центральным отверстием форсунки. Процесс удаления заусенцев поддается управлению за счет выбранного прижима концов проволоки 4 к заусенцам 3 (регулируется перемещением втулки 5 вдоль трубки 6) и изменением режимов анодного растворения заусенца. Кроме того, ток и электролит, протекающие через трубку 6, повышают чистоту поверхности сопла 2.

Для увеличения ресурса теплонапряженных форсунок в ряде случаев повышают площадь теплообмена путем нанесения на них искусственных канавок, неровностей. Одним из эффективных способов повышения теплоотдачи со стороны действия теплового источника может быть создание искусственной шероховатости (например, в месте, показанном стрелкой на рис. 1, *в*) электроэрозионным методом на грубом технологическом режиме (но без нарушения качества поверхностного слоя детали). Из работы [3] известно, что глубина лунки после электроэрозионного разряда может составлять до 1/8 ее диаметра. Тогда площадь теплоотдачи за счет искусственной шероховатости может возрасти на 13...14 %, что улучшит условия работы форсунки и повысит ее ресурс.

Наибольшую сложность при изготовлении и комплектации форсунок представляет формирование сопла, так как, по мнению разработчиков, здесь целесообразно иметь отверстия малого диаметра и сложного контура, что трудно осуществить в производстве традиционными методами. В работе [4] дан достаточно подробный анализ получения отверстий с диаметром от нескольких микрон. Применительно к форсункам



представляют интерес сквозные каналы с диаметром более 0,15 мм и глубиной до 10 диаметров.

В табл. 1 приведены технологические возможности методов получения отверстий, применимых для форсунок.

Механическое сверление материалов, используемых для изготовления сопла, возможно только в незакаленном состоянии (для сталей). Способ имеет ряд ограничений. Применительно к форсункам сверление используют, как правило, для получения круглых отверстий диаметром более 1,5 мм, т.е. для сопел А, приведенных на рис. 1, а.

При изготовлении отверстий с малой площадью сечения путем **прошивки** не удается стабилизировать и

сохранить форму рабочей части форсунки, исключить заусенцы, вытяжку материала, поэтому такой метод не получил широкого применения при изготовлении форсунок.

Лазерная прошивка отверстий с глубиной более 1 диаметра не обеспечивает стабильности их формы и размеров по длине оси, что сильно затрудняет комплектацию форсунок по расходу и распылу. Достоинством метода являются его высокая производительность при малой глубине круглых отверстий и отсутствие потребности в вакууме (что имеет место в случае электронно-лучевой прошивки).

Электрохимическая размерная обработка нашла достаточно широкое применение в двигателях и транс-

Таблица 1

Технологические возможности различных методов получения отверстий в форсунках

№ п/п	Метод обработки круглых отверстий	Технологические показатели				Ограничения использования
		Диаметр отверстий, мм	Точность, квалитет	Параметр шероховатости Ra, мкм	Отношение наибольшей глубины к диаметру	
1	Механический (сверление)	0,1...3,0	7–9	0,1...0,4	10...12	Низкая стойкость сверл, необходимость в специальном оборудовании с частотой вращения шпинделя до 100 тыс. мин ⁻¹ , низкая производительность, ограничения по механическим характеристикам материала
2	Механический (прошивка)	0,04...0,50	15–17	0,1...0,4	10...12	Не допускается закалка материала. Низкая точность, наличие заусенцев, высокая трудоемкость
3	Лазерная прошивка	0,15...0,80	10–12	10...12	10...15	Опасное излучение, нестабильность геометрии отверстий, высокая стоимость оборудования
4	Электрохимическая обработка (в том числе некруглых отверстий)	0,1...0,5	15–19	0,3...0,8 (для твердого сплава)	5...6	Низкие производительность и точность
5	Струйная электрохимическая прошивка	0,2...0,5	17–19	0,8...1,2	8...9	Высокое напряжение, низкая точность, применение агрессивных электролитов
6	Литье деталей с закладными вставками	Более 0,2 (в том числе некруглых отверстий)	17–19	10...12	50...100	Низкая точность и стабильность размеров. Необходимость удаления вставки. Высокая трудоемкость, ограничения по форме и положению осей отверстий



Окончание табл. 1

№ п/п	Метод обработки круглых отверстий	Технологические показатели				Ограничения использования
		Диаметр отверстий, мм	Точность, квалитет	Параметр шероховатости Ra , мкм	Отношение наибольшей глубины к диаметру	
7	Электроэрозионная прошивка	Более 0,005 (в том числе некруглых отверстий)	8–9	0,3...1,2	До 15	Большой износ электрода-инструмента. Низкая производительность, возможность обработки только металлов
8	Комбинированная электроэрозионно-химическая обработка	Более 0,15 (в том числе некруглых отверстий)	7–8	0,32...0,63	До 15	Оптимальная область использования по глубине – до 2 мм. Возможность обработки только металлов
9	Комбинированная электрохимическая обработка с наложением ультразвукового луча в металлических и неметаллических деталях	0,1...1,5 (в том числе некруглых отверстий с различной формой оси)	5–6	0,16...0,63	До 800	Требуется ультразвуковая сирена. Воздействие концентрированного ультразвукового поля

портных системах различного назначения для получения отверстий малого диаметра, например, в кольцевых трубах форсажных коллекторов (см. рис. 3), для уникальных фильтров с отверстиями более 0,05 мм в поперечнике и с многогранным сечением, повышающим фильтрующую способность агрегатов очистки, в том числе топлива, подаваемого через форсунку. Электрохимическая размерная обработка позволяет получать фасонные отверстия с криволинейной осью, в частности каналы с углублением в цельный металл и с возможностью их выхода наружу со стороны входа. Уникальные возможности электрохимической прошивки отверстий малого диаметра слабо реализуются из-за ограниченной производительности и сложности обеспечения высокой точности даже в случае использования электролитов с интенсивной производимостью.

Разновидностью метода электрохимической обработки является *струйная прошивка*, подробно рассмотренная в работе [3]. В этом методе предполагается передача энергии через длинный межэлектродный зазор, поэтому требуются высокое напряжение (до 900 В) и агрессивные (опасные для здоровья) электролиты на базе кислот. Кроме того, трудно обеспечить стабильную геометрию даже круглых отверстий, особенно в случае, если их глубина составляет более четырех диаметров. Для подвода струи электролита используют тонкостенные сопла из хрупких диэлектриков, частая замена которых требует затрат значительного вспомогательного времени. Метод нашел применение в ос-

новном на предприятиях авиадвигателестроения при прошивке тонких стенок турбинных лопаток с целью формирования каналов охлаждения. Не исключается возможность его использования в форсунках с коротким трактом течения рабочей среды.

Известны попытки получения каналов различных сечений в литых и штампованных заготовках *литьем деталей с закладными вставками*, т.е. путем изготовления металлических или диэлектрических вставок по форме требуемых отверстий и установкой их до заливки металла или в специальные отверстия штампуемой детали. Обычно такие вставки вытравливали, что вызывало большие трудозатраты, брак деталей, нарушало экологию и не обеспечивало получения требуемых технологических показателей. Использование подобных методов получения отверстий в соплах в литературе практически не освещалось.

Наиболее широкое применение для формирования сопел в форсунках нашел метод *электроэрозионной прошивки*. Однако, несмотря на крупные целевые исследования, обобщенные в работе [4], производительность процесса (при диаметрах отверстий более 1 мм) значительно уступает механическому сверлению, а износ электрода-инструмента может значительно превышать объем удаленного с отверстия припуска, что вызывает погрешности проточной части форсунок.

Дальнейшие исследования в области нетрадиционных технологий и проектирование *комбинированных электроэрозионно-химических методов обработки с на-*

ложением электрического поля позволили в значительной степени устранить недостатки электроэрозионной прошивки отверстий [3]. В созданных в последние годы электроэрозионных установках часто используют слабо проводящую ток рабочую среду (промышленная вода и др.), т.е. здесь имеет место **комбинированный электрохимический процесс**, который особенно эффективен при прошивке отверстий различного сечения на малую глубину, что соответствует конструкции большинства перспективных форсунок. Это открывает возможность снизить погрешность за счет уменьшения износа электрода-инструмента на порядок и более, увеличить скорость прошивки отверстий с любой геометрией сечений и характером их оси.

Изготовление каналов в керамических форсунках. По мнению специалистов, одним из перспективных направлений создания форсунок является использование для изготовления сопла керамических материалов с закладными вставками, которые требуется удалить из заготовки. Выяснилось, что в случае значительной глубины отверстий малого диаметра при травлении вставок не удастся обеспечить качество проточной части форсунок. Был разработан новый способ [5], открывающий широкие перспективы изготовления отвер-

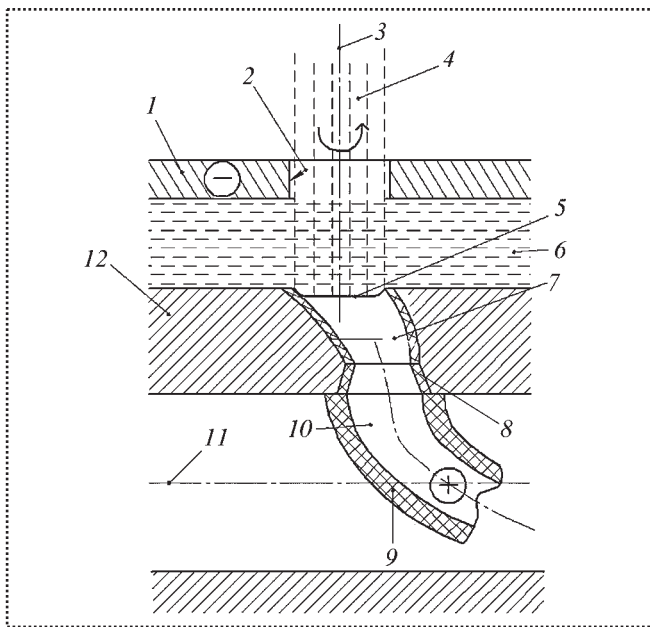


Рис. 5. Схема комбинированного удаления вставки из керамической форсунки:

1 – катод-инструмент; 2 – отверстие для подачи концентрированного ультразвукового луча 4; 3 – ось вращения катода-инструмента 1; 5 – зона анодного растворения вставки 10; 6 – электролит; 7 – сопло форсунки; 8 – диэлектрическое покрытие рабочей части вставки 10; 9 – диэлектрическое покрытие технологического участка вставки 10; 11 – магистраль подвода горючей среды в форсунке; 12 – корпус форсунки

стей в соплах заготовок, полученных из порошка или гранул с металлическими вставками любой формы, сечения и положением оси канала. Сущность этого метода показана на рис. 5.

Метод позволяет получить сопла в металлических и диэлектрических керамических форсунках, механическая обработка которых практически не осуществима, особенно при сложном профиле каналов типа показанных на рис. 5. Геометрические размеры и форма отверстий закладываются при изготовлении рабочей части металлической вставки 10, которую покрывают тонким слоем диэлектрика 8, отделяющего вставку от корпуса форсунки (если он металлический). При этом наружная поверхность вставки 10 с покрытием 8 должна повторять профиль сопла 7. Технологический участок вставки 10 может иметь большее сечение, чем рабочая часть, что обеспечивает повышенную механическую прочность вставки вне сопла, снижает электрическое сопротивление подводу тока, позволяет увеличить толщину диэлектрика 9, избежать коротких замыканий. Сечение технологического участка вставки 10 ограничено размерами магистрали 11 подвода топлива в форсунке. Над торцом вставки 10 с минимальным зазором (0,1 мм и менее) установлен катод-инструмент 1, вращающийся относительно оси 3 с расчетной частотой, позволяющей совмещать оси отверстия 2 и вставки со стороны катода-инструмента 1. В момент совмещения отверстий через катод-инструмент подается концентрированный ультразвуковой луч 4 (луч ультразвуковой сирены), который попадает в зону анодного растворения 5 вставки 10 и интенсивно удаляет продукты обработки. Отверстие 2 защищает выходную кромку корпуса форсунки 12 от разрушения лучом 4, что весьма вероятно для хрупких керамических материалов. Продукты обработки выбрасываются в электролит 6, а зона растворения заполняется свежим электролитом и процесс анодного растворения вставки 10 продолжается до ее полного удаления из сопла. Технологические возможности метода приведены в табл. 1, а возможность реализации – в табл. 2.

Оборудование для изготовления каналов в форсунках. В табл. 2 приведены сведения о электроэрозионном, электрохимическом оборудовании и станках для комбинированной обработки с наложением полей. Анализ табл. 2 показывает, что значительная часть оборудования создавалась в нашей стране в доперестроечный период и много лет успешно обеспечивала потребности изготовления форсунок, в том числе для тепловых двигателей. При этом технические характеристики, определяющие область использования оборудования, остались в новых зарубежных станках (США, Швейцарии, Японии) практически на том же уровне, который был ранее достигнут в отечественном станкостроении. Улучшилась только система ав-



Электроэрозионные и электрохимические станки для прошивки отверстий

№ п/п	Страна и фирма-разработчик	Область использования		Технологические показатели			Примечание
		Диаметр отверстий, мм	Отношение глубины отверстий к диаметру, не более	Погрешность, мкм, не более	Параметр шероховатости Ra , мкм	Скорость прошивки, мм/мин	
<i>Электроэрозионные</i>							
1	СССР (РФ) ЛКЗ-200 [4]	0,025...0,100	10	2...10	0,63	0,1 (глубина до 5)	Имеется вибратор с частотой 100 Гц
2	СССР (РФ) ЛКЗ-34	0,15...0,35	8	12	0,63	0,5...2,0	Имеется вибратор с амплитудой 0,08...0,10 мм, частотой 100 Гц
3	СССР (РФ) ЛКЗ-48	0,3...3,0	10	10	0,32	0,3...0,6	Полуавтомат. Предназначен для обработки металлокерамик
4	СССР (РФ) ЛКЗ-62	0,15	10	10	0,63	0,5...2,0	Автомат для изготовления форсунок
5	Россия ОКБТИ (г. Белгород) [4] ОЧЭП 20	0,02...0,20	15	2...10	0,32...0,63	0,2...2,0	Имеется вибратор с частотой 120 Гц. Вращение шпинделя с частотой 5000 мин ⁻¹ . Прокатка рабочей жидкости с напором до 200 м. Возможна настройка на электроэрозионно-химическую обработку. Оснащен двумя оптическими головками
6	Электроискровая дрель с ручным управлением "Elerkom-1НМ" (США)	0,2...1,0	50	20	1,6...2,5	0,5...10,0	Орбитальное вращение инструмента. Глубина измененного слоя в отверстии до 12 мкм
7	США "Kane Corporation" [4]	0,05...2,00	100	2...10	0,32...0,63	0,05...0,20	Циклическая обработка с выводом инструмента с частотой 0,1...1,0 Гц
8	Швейцария "Agie"	0,03...2,00	10	2	0,32...0,63	0,5	Вибратор с частотой 120 Гц. Вращение шпинделя с частотой до 100 мин ⁻¹
9	Япония "Matsushita" MG-ED 01	0,015...0,300	3...5	1...2	0,16...0,32	0,5	Вращение шпинделя с частотой 3400 мин ⁻¹ . Имеет микроскоп и блок цифровой индексации перемещений
10	Япония "Matsushita" ED-06	0,03...2,00	5...10	2...5	0,32...0,63	0,3...0,5	Вращение шпинделя с частотой 3400 мин ⁻¹ . Имеет микроскоп и блок цифровой индексации перемещений
<i>Электрохимические</i>							
11	Россия СЭХО-901	0,5...3,0	8...10	10...15	0,63	2,5...40,0	Оснащен системой адаптивного управления процессом. Имеет блок с ЧПУ. Пригоден для комбинированной электроэрозионной обработки и для электрохимической обработки с наложением ультразвуковых колебаний

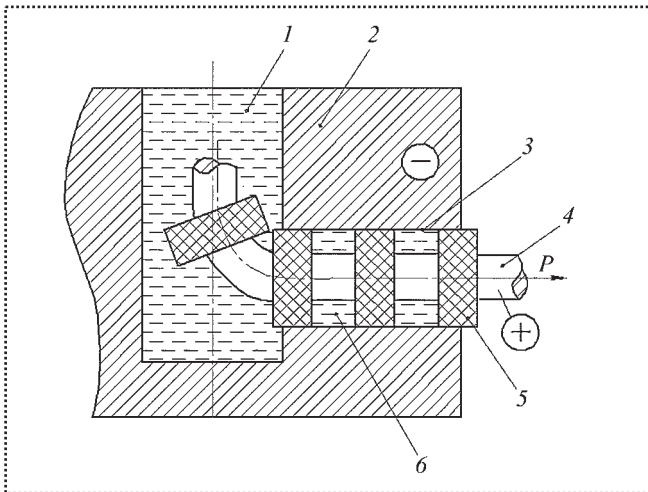


Рис. 6. Схема гальваномеханического изменения проходного сечения сопел:

1 – магистральный канал в корпусе 2 форсунки; 3 – канал в сопле форсунки; 4 – электрод-проволока; 5 – дорнующие диэлектрические пояски; 6 – жидкая рабочая среда; P – сила протягивания электрода-проволоки

томатизации, хотя уровень отечественных разработок (см. табл. 2) по созданию адаптивного оборудования для электрохимической и комбинированной обработки пока никем не достигнут. Имеет смысл в рамках программы по восстановлению отечественного станкостроения провести исследования и создать современное оборудование для изготовления каналов не только в форсунках, но и в охлаждающих системах авиационных и ракетных двигателей, для отопительных систем и других изделий машиностроения. Стоимость такого оборудования будет в 5–10 раз ниже, чем приобретенного по импорту. Целесообразно начать изготовление отечественного оборудования на совместных предприятиях в регионах страны, имеющих опыт выпуска и ремонта станков.

Подбор, доводка и комплектация форсунок с учетом их размещения в зоне горения смесей. В работах [1, 2] показано, что размещение форсунок, например на огневом днище (см. рис. 2) ракетных двигателей, требует их доводки по расходу, распылу в пределах участков установки и каждого сопла многоструйных форсунок, которые весьма дорогостоящие. Типовым случаем неисправимого брака было нарушение проходного сечения одного из сопел с выходом размера за допустимые пределы. Получить качественный слой в одном или нескольких отверстиях можно путем нанесения гальваномеханического покрытия по схеме, приведенной на рис. 6. Для этого используют инструмент 4 в виде проволоки с твердыми диэлектрическими поясками 5 (например, с напыленной металлоке-

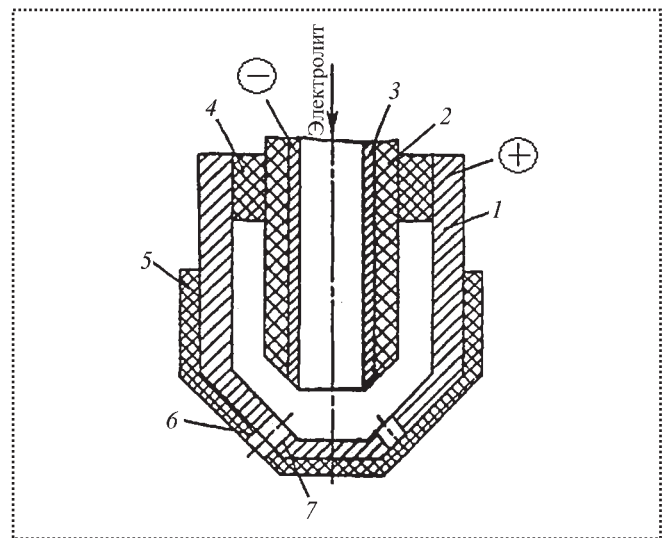


Рис. 7. Изменение расхода и распыла многоканальных форсунок:

1 – корпус форсунки; 2 – диэлектрическое покрытие; 3 – трубчатый инструмент-катод; 4 – диэлектрическая втулка; 5 – заглушка; 6 – отверстие в заглушке; 7 – сопло в форсунке

рамикой), которую с расчетной силой (P на рис. 6) протягивают через канал 3 корпуса 2. При этом наружный диаметр (или сечение) поясков 5 снижается на величину наращивания слоя покрытия в канале 3 за счет осаждения из электролита 6 металла (например, хрома). Электрод-проволока 4 вводится в зону обработки через магистральный канал 1. Число поясков 5 выбирают так, чтобы последний из них упрочнял диаметр отверстия 3, требуемого после нанесения покрытия. Скорость наращивания покрытия невелика (2...5 мкм/мин), но после выполнения рассматриваемой операции обеспечивается получение сопла с погрешностью $\pm 2...5$ мкм с параметром шероховатости $Ra = 0,08...0,16$ мкм, высокой адгезией и износостойкостью покрытия. Это делает операцию экономически обоснованной и позволяет комплектовать форсунки с учетом условий эксплуатации.

В работе [6] раскрыт способ управления распылом многоканальных и групп одноканальных форсунок на огневых днищах (см. рис. 2).

Для изменения расхода (рис. 7) горючей смеси внутри корпуса 1 форсунки устанавливают трубчатый инструмент-катод 3, через отверстие в котором подают электролит. На наружную часть инструмента-катаода 3 наносят диэлектрическое покрытие 2 так, чтобы рабочая часть инструмента 3 в корпусе 1 противостолежала соплам 7 в форсунке. Диэлектрическая втулка 4 позволяет регулировать межэлектродный зазор между инструментом-катодом 3 и внутренней кромкой сопла 7. На форсунку устанавливают заглушку 5 с от-



вертием 6, противолежащим наружной поверхности сопла 7. Доводку сопел (или групп одноструйных форсунок) по расходу выполняют в следующем порядке: на стенде для измерения расхода рабочей среды измеряют характеристики каждого сопла, затем переносят форсунку на электрохимическую установку, подводят электролит, ток на инструмент-катод 3 и корпус 1 форсунки (анод), устанавливая сопло с наибольшим расходом, закрывают его заглушкой 5, открывают сопло с меньшим расходом, рассчитывают по количеству электричества съём металла с сопла, требуемый для расширения проходного сечения, и последовательно выравнивают расход через все сопла.

Способ, показанный на рис. 7, позволяет изменить распыл топлива путем скругления кромки на входе в сопла, что достигается поворотом заглушки и регулированием межэлектродного зазора.

Выводы

1. Для большинства применяемых и перспективных конструкций форсунок требуется совершенствование формы и размеров проходных сечений сопел, однако ограниченные возможности их изготовления не позволяют разработчикам закладывать в конструкцию наукоемких изделий форсунки, обеспечивающие наилучшие эксплуатационные показатели тепловых устройств новых поколений техники.

2. Применение новых технологических процессов открывает возможность использования для форсунок со-

временных материалов, обладающих высокими характеристиками при подаче горючих смесей, но трудно поддающихся обработке традиционными методами.

3. Предложены эффективные способы улучшения эксплуатационных показателей форсунок, в частности, путем их восстановления по расходным характеристикам, подбора в группы с требуемыми тепловыми нагрузками. Это дает возможность расширить область применения и улучшить экономические показатели тепловых двигателей.

Библиографический список

1. Патент 2158841 (РФ). Камера жидкостного ракетного двигателя и ее корпус / А.А. Васин и др. Бюллетень № 42. 2000.
2. Каторгин Б.И. Перспективы создания мощных жидкостных ракетных двигателей // Вестник российской академии наук. 2004. Т. 74. № 3. С. 499–506.
3. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.
4. Бойко А.Ф. Эффективная технология и оборудование для электроэрозионной прошивки прецизионных микроотверстий. Белгород: изд-во БГТУ, 2010. 314 с.
5. А.с. № 1673329 (СССР). Способ изготовления диэлектрических деталей с отверстиями / В.П. Смоленцев, В.Т. Трофимов, В.В. Трофимов. Бюл. № 32. 1991.
6. Патент 2162394 (РФ). Способ доводки форсунок / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев и др. Бюл. № 3. 2001.

Читайте в следующем номере:



- ✓ Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Фазовые портреты относительного и углового совмещения деталей при автоматизированной сборке
- ✓ Макушин А.А. Технологические схемы сборки изделий автомобильной техники
- ✓ Медведев А.М., Мылов Г.В. Эволюция технологий электрических межсоединений в электронном приборостроении
- ✓ Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Нормирование точностных характеристик промышленных роботов

УДК 621.757

Л.В. Божкова, М.В. Вартанов, д-ра техн. наук,
 Н.А. Мартынович, аспирант (Университет машиностроения)
 E-mail: iptm@mami.ru, martynovich.nikita@mami.ru

Математическая модель динамики сопряжения деталей с применением промышленного робота и вибрационного устройства

Представлена математическая модель динамики роботизированного сопряжения деталей типа "вал-штулка" с применением пассивной адаптации на базе вибрационной опоры.

Proposed a mathematical model of dynamics of the "shaft-hub" parts assembly by means of passive adaptation based on the vibratory cycling method.

Ключевые слова: динамика сопряжения, робот, сборка, вал-штулка, вибрационные колебания, пассивная адаптация.

Keywords: dynamics of assembly, robot, assembly, shaft-hub, vibratory cycling, passive adaptation.

Введение

Погрешность позиционирования промышленного робота с программным управлением и пассивной адаптацией зачастую не соответствует требуемым условиям собираемости деталей. При этом целесообразно использование специализированных устройств, существенно уменьшающих первоначальную погрешность позиционирования робота.

В работах [1, 2] предложена конструкция такого дополнительного специализированного устройства, представляющего собой двухзвенный манипулятор, каждое звено которого приводится в движение от отдельного привода. Звенья этого устройства одновременно совершают вибрационные колебания вокруг взаимно перпендикулярных осей. Штулка (базовая деталь) закреплена на диске, жестко связанном со вторым звеном двухзвенного специализированного устройства. Устанавливаемая деталь – вал – упруго базируется в схвате робота (рис. 1, а).

При этом упругие связи в схвате допускают перемещения устанавливаемой детали в вертикальной плоскости по двум взаимно перпендикулярным направлениям (рис. 1, б).

Для определенности на рис. 1, а введены три системы координат с общим началом в точке O :

- $Oxyz$ – неподвижная система координат;

- $Ox_1y_1z_1$ и $O\xi\eta\zeta$ – системы координат, жестко связанные, соответственно, с первым и вторым звеньями вибрационного устройства. Система координат $c_2x_2y_2z_2$ жестко связана с схватом робота (рис. 1, б).

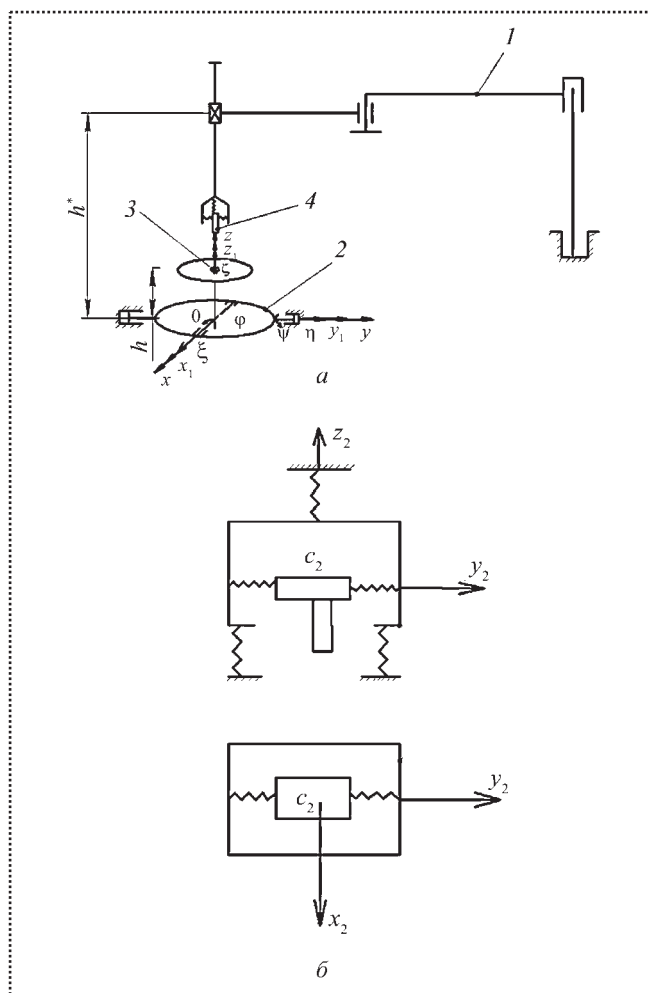


Рис. 1. Кинетическая схема роботизированной сборки при наличии вспомогательного специализированного вибрационного устройства (а) и пассивной адаптивной головки (б):
 1 – робот; 2 – вибрационное устройство; 3 – базовая деталь (штулка); 4 – устанавливаемая деталь (вал)



Вибрационные колебания звеньев устройства происходят вокруг осей Oy и Oy_1 по законам:

$$\psi = A \sin kt; \quad \varphi = A \cos kt, \quad (1)$$

где A – амплитуда;

k – круговая частота колебаний;

t – время.

Рабочим движением основного манипулятора на этапе сопряжения деталей является поступательное перемещение звена, несущего схват вертикально вниз. В работе [1] рассмотрен случай, когда первоначальный контакт устанавливаемой детали происходит в одной точке с плоскостью ориентирующего диска, на котором закреплена втулка. Для этого случая получены дифференциальные уравнения движения центра масс устанавливаемой детали по отношению к неинерциальной системе отчета координат $O\xi\eta\zeta$, жестко связанной с базовой деталью. Анализ численного решения полученной системы дифференциальных уравнений показывает, что существуют области значений основных динамических и конструктивных параметров сборочного устройства, обеспечивающих асимптотическое приближение центра масс устанавливаемой детали к оси базовой детали. При этом выполняются условия собираемости.

При дальнейшем сопряжении деталей возможны контакты сопрягаемых деталей в одной и в двух точках.

На первом этапе решения данной задачи исследуем случай контакта сопрягаемых деталей в одной точке. При этом возможны два варианта контакта деталей:

1) контакт торца базовой детали с образующей устанавливаемой детали (рис. 2, а);

2) контакт торца устанавливаемой детали с образующей базовой детали (рис. 2, б).

На рис. 2 показана система координат $c x_3 y_3 z_3$, жестко связанная с устанавливаемой деталью.

Для каждого из вариантов контакта сопрягаемых деталей необходимо построить дифференциальные уравнения движения центра масс вала (т. с) по отношению к неинерциальной системе координат $O\xi\eta\zeta$, жестко связанной с базовой деталью.

Часть I.

Дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала при контакте его образующей с торцом втулки

Дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала в форме второго закона Ньютона имеют вид [3]:

$$m \bar{a}_{cr} = m \bar{g} + \bar{N}_1 + \bar{F}_{тр}^{(1)} + \bar{F}^{yn} + \bar{F}_{ce}^{ин} + \bar{F}_{ck}^{ин} + \bar{F}, \quad (2)$$

где m – масса вала;

\bar{a}_{cr} – относительное ускорение центра масс вала;

$m \bar{g}$ – сила тяжести вала;

\bar{N}_1 и $\bar{F}_{тр}^{(1)}$ – нормальная реакция и сила трения в

точке контакта деталей k_1 (рис. 2, а);

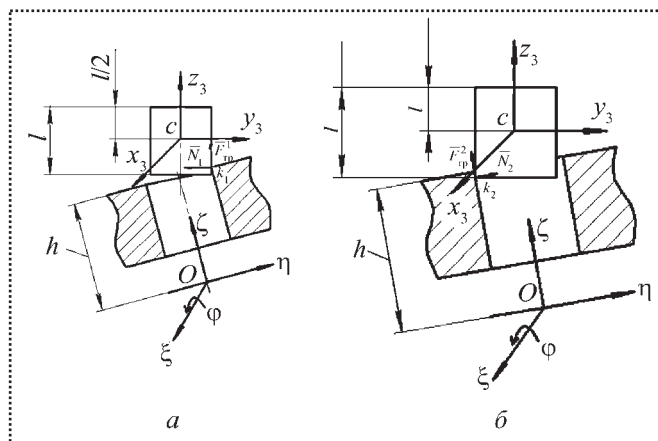


Рис. 2. Контакт сопрягаемых деталей в одной точке:

а – торца базовой детали с образующей устанавливаемой детали; б – торца устанавливаемой детали с образующей базовой детали

\bar{F}^{yn} – равнодействующая упругих сил в схвате;

$\bar{F}_{ce}^{ин}$, $\bar{F}_{ck}^{ин}$ – переносная и Кориолиса силы инерции центра масс вала;

\bar{F} – сборочное усилие, развиваемое приводом робота.

Дифференциальное уравнение (2) необходимо представить в проекциях на оси координат системы $O\xi\eta\zeta$. При этом будем учитывать, что вибрационные колебания происходят с малыми по величине амплитудами, т.е. углы ψ и φ малы. Следовательно, приближенно можно считать, что:

$$\begin{aligned} \sin \psi &\approx \psi; & \sin \varphi &\approx \varphi; \\ \cos \psi &\approx 1; & \cos \varphi &\approx 1. \end{aligned} \quad (3)$$

На основании результатов работы [1] найдем проекции силы упругости \bar{F}^{yn} , переносной и Кориолиса сил инерции центра масс вала $\bar{F}_{ce}^{ин}$ и $\bar{F}_{ck}^{ин}$, а также сборочного усилия \bar{F} на оси системы координат $O\xi\eta\zeta$:

$$\begin{cases} F_{\xi}^{yn} = -c(\xi_c + z_{c2} \psi); \\ F_{\eta}^{yn} = -c(\eta_c + z_{c2} \varphi); \\ F_{\zeta}^{yn} = -c(\zeta_c + z_{c2}); \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} F_{ce\xi}^{ин} = m(\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\psi} \varphi - 2\eta_c \dot{\psi} \dot{\varphi} - \zeta_c \dot{\psi} \dot{\varphi} \varphi); \\ F_{ce\eta}^{ин} = m(\xi_c \ddot{\psi} \varphi + \eta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2 \varphi + \zeta_c \ddot{\varphi}); \\ F_{ce\zeta}^{ин} = m(\xi_c \ddot{\psi} + \eta_c \dot{\psi}^2 \varphi - \eta_c \ddot{\varphi} + \zeta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} F_{ck\xi}^{ин} = m(-2\dot{\psi} \dot{\xi}_c - 2\dot{\eta}_c \dot{\psi} \varphi), \\ F_{ck\eta}^{ин} = m(2\dot{\xi}_c \dot{\psi} \varphi + 2\dot{\zeta}_c \dot{\varphi}), \\ F_{ck\zeta}^{ин} = m(-2\eta_c \dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c \dot{\psi}). \end{cases} \quad (6)$$

$$F_{\xi} = F\psi; \quad F_{\eta} = -F\varphi; \quad F_{\zeta} = -F. \quad (7)$$



где c – коэффициент жесткости упругих элементов;
 $\xi_c \eta_c \zeta_c$ – координаты центра масс вала;
 z_{c2} – значение координаты z точки схвата c_2 (см. рис. 1, б) в неподвижной системе координат.

Для построения дифференциальных уравнений движения центра масс вала в случае одноточечного контакта торца базовой детали и образующей устанавливаемой (рис. 2, а) необходимо найти проекции нормальной реакции \bar{N}_1 и силы трения $\bar{F}_{\text{тр}}^{(1)}$ (рис. 2, а) на оси системы координат $O\xi\eta\zeta$.

С этой целью применим аппарат матриц преобразования однородных координат [4].

Учитывая функциональные возможности упругих деформаций в схвате, следует ожидать, что точка контакта k_1 сопрягаемых деталей будет расположена в координатной плоскости cy_3z_3 системы координат, жестко связанной с устанавливаемой деталью. При этом нормальная реакция \bar{N}_1 будет перпендикулярна оси cz_3 и параллельна cy_3 (см. рис. 2, а). Таким образом, известны проекции нормальной реакции \bar{N}_1 на оси системы координат $cx_3y_3z_3$:

$$N_{1x3} = 0; \quad N_{1y3} = -N_1; \quad N_{1z3} = 0. \quad (8)$$

Проекция нормальной реакции \bar{N}_1 на оси системы координат $O\xi\eta\zeta$ можно определить по формуле [3]:

$$\begin{Bmatrix} N_{1\xi} \\ N_{1\eta} \\ N_{1\zeta} \end{Bmatrix} = [\text{lg}] \begin{Bmatrix} N_{1x3} \\ N_{1y3} \\ N_{1z3} \end{Bmatrix}, \quad (9)$$

где $[\text{lg}]$ – матрица направляющих косинусов, определяющая направление осей системы координат $cx_3y_3z_3$, жестко связанной с валом, по отношению к осям системы координат $cx_3y_3z_3$, связанной с втулкой.

Матрица $[\text{lg}]$ в соответствии с данными работы [1] имеют вид:

$$[\text{lg}] = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & -\sin \psi \\ \sin \psi \cos \varphi & \cos \varphi & \cos \psi \sin \varphi \\ \cos \psi \sin \varphi & -\sin \varphi & \cos \psi \cos \varphi \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Таким образом, на основании выражения (9) с учетом формул (8), (10) и (3) получим:

$$N_{1\xi} = 0; \quad N_{1\eta} = -N_1; \quad N_{1\zeta} = N_{1\varphi}. \quad (11)$$

Проекция силы трения $\bar{F}_{\text{тр}}^{(1)}$ на оси системы координат $cx_3y_3z_3$, жестко связанной с устанавливаемой деталью, известны:

$$F_{\text{тр}x3}^{(1)} = 0; \quad F_{\text{тр}y3}^{(1)} = 0; \quad F_{\text{тр}z3}^{(1)} = F_{\text{тр}}^{(1)} = f N_1, \quad (12)$$

где f – коэффициент трения скольжения.

Проекция силы трения $\bar{F}_{\text{тр}}^{(1)}$ на оси подвижной системы координат $O\xi\eta\zeta$, жестко связанной с базовой деталью, определяют по формуле:

$$\begin{Bmatrix} F_{\text{тр}\xi}^{(1)} \\ F_{\text{тр}\eta}^{(1)} \\ F_{\text{тр}\zeta}^{(1)} \end{Bmatrix} = [\text{lg}] \begin{Bmatrix} F_{\text{тр}x3}^{(1)} \\ F_{\text{тр}y3}^{(1)} \\ F_{\text{тр}z3}^{(1)} \end{Bmatrix}. \quad (13)$$

На основании формулы (13) с учетом формул (12), (10) и (3) получим:

$$\begin{aligned} F_{\text{тр}\xi}^{(1)} &= -f N_1 \psi; \\ F_{\text{тр}\eta}^{(1)} &= f N_1 \varphi; \\ F_{\text{тр}\zeta}^{(1)} &= f N_1. \end{aligned} \quad (14)$$

Дифференциальные уравнения (2) движения центра масс устанавливаемой детали в проекциях на оси подвижной системы координат с учетом формул (4)–(7), (11) и (14) принимают вид:

$$\begin{aligned} m\ddot{\xi}_c &= -f N_1 \psi - c(\xi_c + z_{c2} \psi) + \\ &+ m(\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\psi} \varphi - 2\eta_c \dot{\psi} \dot{\varphi} - \zeta_c \ddot{\psi} + 2\zeta_c \dot{\psi} \dot{\varphi}) + \\ &+ m(-2\dot{\psi} \dot{\zeta}_c - 2\dot{\eta}_c \dot{\varphi}) + F \psi; \\ m\ddot{\eta}_c &= -N_1 + f N_1 \varphi - c(\eta_c - z_{c2} \varphi) + \\ &+ m(\xi_c \ddot{\psi} \varphi + \eta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2 \varphi + \zeta_c \ddot{\varphi}) + \\ &+ m(2\dot{\xi}_c \dot{\psi} \varphi + 2\dot{\zeta}_c \dot{\varphi}) - F \varphi; \\ m\ddot{\zeta}_c &= N_1 \varphi + f N_1 - c(\zeta_c - z_{c2}) + \\ &+ m(\xi_c \ddot{\psi} + \eta_c \dot{\psi}^2 \varphi - \eta_c \ddot{\varphi} + \zeta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2) + \\ &+ m(-2\dot{\eta}_c \dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c \dot{\psi}) - F. \end{aligned} \quad (15)$$

При отсутствии контакта сопрягаемых деталей центр масс устанавливаемой детали (т. с) имеет три степени свободы. При этом положение центра масс характеризуется тремя независимыми параметрами (координатами ξ_c , η_c , ζ_c). При контакте детали в одной точке k_1 одна степень свободы центра масс теряется.

В соответствии с функциональными возможностями упругих связей в схвате координатами точки контакта k_1 в системе координат $cx_3y_3z_3$ являются:

$$x_{k1}^{(3)} = 0; \quad y_{k1}^{(3)} = r; \quad z_{k1}^{(3)} = ?, \quad (16)$$

где r – радиус устанавливаемой детали;

$z_{k1}^{(3)}$ – неизвестная координата.

Между координатами точки k_1 в системах координат $O\xi\eta\zeta$ и $cx_3y_3z_3$ существует зависимость [4]:

$$\begin{Bmatrix} \xi_{k1} \\ \eta_{k1} \\ \zeta_{k1} \\ 1 \end{Bmatrix} = [\text{Bg}] \begin{Bmatrix} x_{k1}^{(3)} \\ y_{k1}^{(3)} \\ z_{k1}^{(3)} \\ 1 \end{Bmatrix}, \quad (17)$$

где $[\text{Bg}]$ – матрица, определяющая положение системы координат $cx_3y_3z_3$ относительно $O\xi\eta\zeta$.



На основании формулы (17) с учетом формул (16), (10) и (3) получим:

$$\begin{aligned}\xi_{k1} &= -z_{k1}^{(3)} \psi + \xi_c, \\ \eta_{k1} &= r + z_{k1}^{(3)} \varphi + \eta_c, \\ \zeta_{k1} &= -r\varphi + z_{k1}^{(3)} + \zeta_c.\end{aligned}\quad (18)$$

При контакте сопрягаемых деталей в точке k_1 известна координата ξ_{k1} , а именно:

$$\xi_{k1} = h. \quad (19)$$

Кроме того, на этапе сопряжения деталей третье звено манипулятора, несущего схват, опускается равномерно с некоторой скоростью v . При этом

$$z_{k1}^{(3)} = vt - l, \quad (20)$$

где t – время, отсчитываемое от момента, соответствующего началу сопряжения деталей;

l – размер устанавливаемой детали.

На основании третьего соотношения (18) с учетом формул (19) и (20) найдем:

$$\zeta_c = h + l + r\varphi - vt. \quad (21)$$

На основании третьего уравнения системы (15) с учетом выражения (21) можно определить нормальную реакцию N_1 :

$$\begin{aligned}\frac{N_1}{m} &= \frac{1}{f + \varphi} [r\ddot{\varphi} + \frac{c}{m}(\zeta_c - z_{c2}) - \\ &- (\xi_c \ddot{\psi} + \eta_c \dot{\psi}^2 \varphi - \eta_c \ddot{\varphi} + \zeta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2) - \\ &- (-2\dot{\eta}_c \dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c \dot{\psi}) + \frac{F}{m}].\end{aligned}\quad (22)$$

В результате подстановки уравнения (22) в первые два уравнения системы (15) получим систему двух дифференциальных уравнений, характеризующих движение центра масс устанавливаемой детали по отношению к системе координат, связанной с базовой деталью, в случае одноточечного контакта образующей вала с торцом втулки:

$$\left\{ \begin{aligned}\ddot{\xi}_c &= -\frac{f\psi}{f + \varphi} [r\ddot{\varphi} + \frac{c}{m}(\zeta_c - z_{c2}) - \\ &- (\xi_c \ddot{\psi} + \eta_c \dot{\psi}^2 \varphi - \eta_c \ddot{\varphi} + \zeta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2) - \\ &- (-2\dot{\eta}_c \dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c \dot{\psi}) + F] - \frac{c}{m}(\xi_c + z_{c2}\psi) + \\ &+ (\xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\varphi} - 2\eta_c \dot{\varphi} \dot{\psi} - \zeta_c \ddot{\psi} + 2\zeta_c \dot{\psi} \dot{\varphi}) + \\ &+ (-2\dot{\psi} \dot{\zeta}_c - 2\dot{\eta}_c \dot{\psi} \varphi) + \frac{F}{m} \psi; \\ \ddot{\eta}_c &= -\frac{1}{f + \varphi} [r\ddot{\varphi} + \frac{c}{m}(\zeta_c - z_{c2}) - \\ &- (\xi_c \ddot{\psi} + \eta_c \dot{\psi}^2 \varphi - \eta_c \ddot{\varphi} + \zeta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2) - \\ &- (-2\dot{\eta}_c \dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c \dot{\psi}) + F] - \frac{c}{m}(\eta_c - z_{c2}\varphi) + \\ &+ (\xi_c \ddot{\psi} \varphi + \eta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2 \varphi + \zeta_c \ddot{\varphi}) + (2\dot{\xi}_c \dot{\psi} \varphi + 2\dot{\zeta}_c \dot{\varphi}) - \frac{F}{m} \varphi.\end{aligned}\right.\quad (23)$$

При получении второго уравнения системы (23) пренебрегаем слагаемым $f\varphi$. При нарушении контакта детали в точке k_1 нормальная реакция $N_1 = 0$ и $F_{\text{тр}}^{(1)} = 0$. При этом дифференциальные уравнения (15) относительного движения центра масс можно привести к виду:

$$\left\{ \begin{aligned}\ddot{\xi}_c &= -\frac{c}{m}(\xi_c + z_{c2}\psi) + \xi_c \dot{\psi}^2 - \eta_c \ddot{\varphi} - 2\eta_c \dot{\varphi} \dot{\psi} - \zeta_c \ddot{\psi} + \\ &+ 2\zeta_c \dot{\psi} \dot{\varphi} - 2\dot{\psi} \dot{\zeta}_c - 2\dot{\eta}_c \dot{\psi} \varphi + \frac{F}{m} \psi; \\ \ddot{\eta}_c &= -\frac{c}{m}(\eta_c - z_{c2}\varphi) + \xi_c \ddot{\psi} \varphi + \eta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2 \varphi + \\ &+ \zeta_c \ddot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c \dot{\psi} \varphi + 2\dot{\zeta}_c \dot{\varphi} - \frac{F}{m} \varphi; \\ \ddot{\zeta}_c &= -\frac{c}{m}(\zeta_c - z_{c2}) + \xi_c \ddot{\psi} + \\ &+ \eta_c \dot{\psi}^2 \varphi - \eta_c \ddot{\varphi} + \zeta_c \dot{\varphi}^2 + \zeta_c \dot{\psi}^2 - 2\dot{\eta}_c \dot{\varphi} + 2\dot{\xi}_c \dot{\psi} - \frac{F}{m}.\end{aligned}\right.\quad (24)$$

При получении дифференциального уравнения относительного движения центра масс – формулы (23) и (24) – было учтено, что статические составляющие сил упругости уравновешены силами (в том числе силой тяжести детали), вызвавшими деформацию упругих элементов в схвате в положении статического равновесия.

Дифференциальные уравнения (23) и (24) содержат неизвестную координату z_{c2} , которая может быть определена по формуле (см. рис. 1, а):

$$z_{c2} = (l + h) - vt. \quad (25)$$

Таким образом, дифференциальные уравнения (23) с учетом формул (21) и (25) определяют относительное движение центра масс вала при контакте сопрягаемых деталей в точке k_1 .

Далее необходимо построить дифференциальные уравнения относительного движения центра масс вала при контакте его торца с образующей втулки.

Продолжение работы будет опубликовано в следующих номерах журнала.

Библиографический список

1. Божкова Л.В., Варганов М.В., Чуканова О.В., Кольгунин Е.И. Метод роботизированной сборки с использованием вибрационных колебаний // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 9. С. 19–24.
2. Божкова Л.В., Варганов М.В., Бакена Мбуа Ж.К. Совершенствование технологии сборки цилиндрических продольных деталей с применением вибрационных колебаний и пассивной адаптации // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 7. С. 26–32.
3. Добронравов В.В., Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. М.: Высшая школа, 1983. 575 с.
4. Колосовский М.З., Слоущ А.В. Основы динамики промышленных роботов. М.: Наука, 1988. 240 с.

УДК 621.717

А.И. Абрамов, канд. техн. наук, доцент, **И.В. Абрамов**, д-р техн. наук, профессор,
А.В. Романов, аспирант (Ижевский государственный технический университет)
 E-mail: stariy_35@mail.ru

Научно-технические аспекты автоматизации гидропрессовой сборки соединения с натягом

Проведен анализ основных зависимостей гидромеханики, сформированы в общем виде законы и алгоритмы управления гидропрессовой сборкой для различных технологических схем.

Basic relations of hydromechanics are analyzed. Hydro-press assembly control laws and algorithms for various process flowsheets are formed in general.

Ключевые слова: автоматизация, гидропрессовая сборка, соединение с натягом.

Keywords: automation, hydro-press assembly, pressure coupling.

Впервые возможность автоматизации гидропрессовой сборки (ГС) была показана в работе [1], в которой рассмотрена схема автоматической установки, реализующей дифференциальный способ создания давления в масляной прослойке [2]. В работах [2–4] было исследовано влияние вязкости масла, углов фасок, скорости запрессовки на усилие запрессовки, коэффициент трения и качество поверхностей. Анализ этих и других работ показывает, что технологические схемы гидропрессовой сборки можно разделить на две группы, отличающиеся друг от друга способом создания масляной прослойки.

Теоретические положения для 1-й группы технологических схем

Графическая модель гидропрессового соединения и схемы подвода масла в зону контакта от внешнего источника (насоса) высокого (до 200 МПа) давления представлена на рис. 1.

Как известно, при заданных характеристиках насоса, а именно: создаваемом давлении q_M , МПа, и расходе масла Q_M , м³/с, в зоне контакта создается зазор, заполненный маслом, и обеспечивается режим жидкостного трения.

Максимальная величина давления q_M^{\max} ограничена возникновением пластической деформации из условия [1]:

$$q_M^{\max} \leq 0,58 \sigma_T \left[1 - \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right], \quad (1)$$

где σ_T – предел текучести материала, МПа;

d – диаметр посадки, м;

D – наружный диаметр втулки, м.

Требуемый расход Q_M определяется по формуле [2]:

$$Q_M = \pi \frac{d}{2} \left[\frac{h^3}{6 \eta_0 l c \beta} \left(1 - \frac{1}{e^{c q_M - \beta r^2 c}} \right)^2 \pm v h \right], \quad (2)$$

где h – требуемый для жидкостного трения зазор, м, $h \geq 1,1 (\gamma_1 R_{z1} - \gamma_2 R_{z2})$. Здесь γ_1 и γ_2 – коэффициенты смятия микронеровностей на посадочных поверхностях соответственно вала и ступицы; R_{z1} , R_{z2} – высота микронеровностей, м;

η_0 – вязкость масла, сСт;

l – длина запрессовки, м;

c – пьезокоэффициент изменения вязкости масла от давления;

β – температурный коэффициент изменения вязкости от температуры;

v – скорость запрессовки, м/с.

При $l = l_1$ в формуле (2) перед скоростью запрессовки v должен быть знак "+", а при $l = l_2$ – знак "-". При $l = l_1 + l_2$ находят минимальное давление:

$$q_M^{\min} = \frac{1,2 \delta_{\min}}{d \left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2} \right)}, \quad (3)$$

где δ_{\min} – минимальный табличный натяг, м;

d – номинальный диаметр посадки, м;

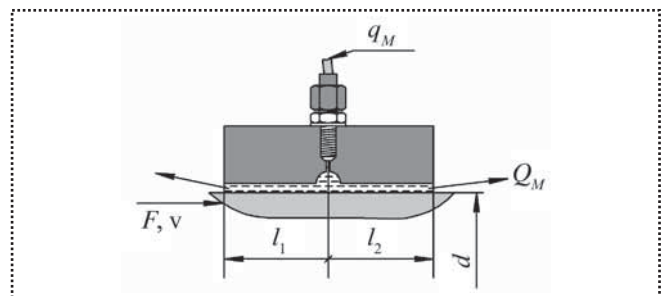


Рис. 1. Гидропрессовое соединение с внешним источником давления:

F и v – сила и скорость запрессовки; l_1 и l_2 – длины запрессовки

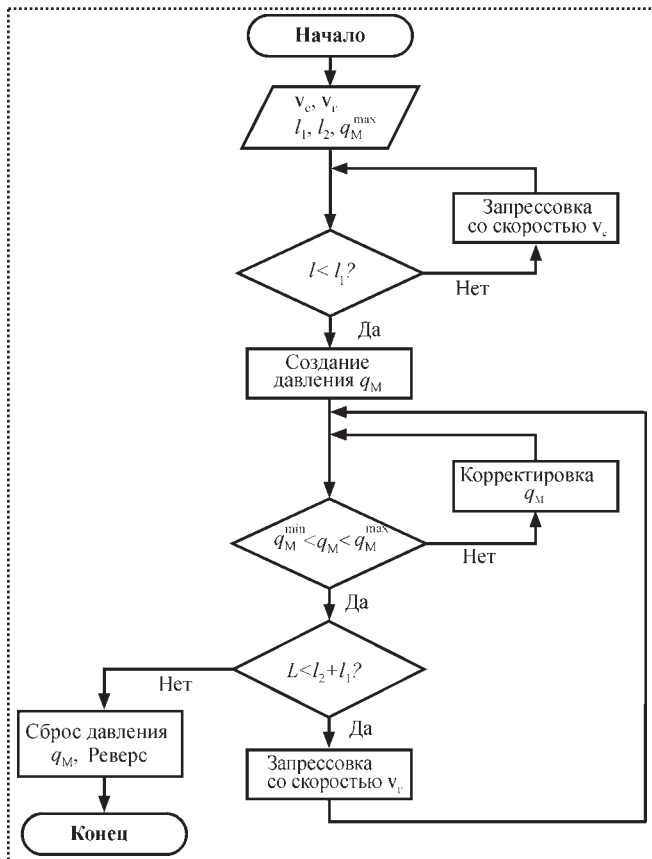


Рис. 2. Управляющий алгоритм гидропрессовой сборки при внешнем источнике давления

C_1 и C_2 – коэффициенты жесткости вала и ступицы;

E_1 и E_2 – модули упругости материала вала и ступицы, МПа.

Коэффициенты C_1 и C_2 находят по формулам:

$$C_1 = \frac{1 - \left(\frac{d_1}{d}\right)^2}{1 + \left(\frac{d_1}{d}\right)^2} - \mu_1; \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2}{1 + \left(\frac{d}{D}\right)^2} + \mu_2,$$

где d_1 – диаметр внутреннего отверстия вала, м;

D – наружный диаметр ступицы, м;

μ_1 и μ_2 – коэффициенты Пуассона.

Сила запрессовки для участка сухого трения

$$F_c = \frac{\delta \pi l f_c}{\left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right)}, \quad (5)$$

где f_c – коэффициент сухого трения.

Сила запрессовки на участке жидкостного трения находится по формуле

$$F_r = q_m \pi d l f_r, \quad (6)$$

где f_r – коэффициент жидкостного трения.

Алгоритм управляющей программы автоматической гидропрессовой сборки при внешнем источнике давления представлен на рис. 2.

Из представленного алгоритма видно, что система управления регулирует основной технологический параметр скорости запрессовки v для двух режимов трения – сухого v_c и жидкостного v_r .

В режиме жидкостного трения система управления дополнительно поддерживает давление масла q_m на уровне $q_m^{\min} < q_m < q_m^{\max}$.

Дополнительно в алгоритм и управляющую программу могут быть включены контроль расхода масла Q_m и силы запрессовки F , что позволит более качественно обеспечить режим жидкостного трения.

Очевидно, что выбор типа системы управления: следящий, адаптивный или с искусственным интеллектом – будет зависеть от требований по производительности и качества гидропрессовой сборки.

Теоретические положения для 2-й группы технологических схем

Графическая модель гидропрессовой сборки при подводе масла с торца вала представлена на рис. 3.

Эта технологическая схема отличается от предыдущей тем, что необходимое для жидкостного трения давление масла создается путем его сжатия в рабочей полости. Следовательно, сила F представляет собой сумму сил запрессовки F_r и от давления масла F_m , т.е.

$$F = F_r + F_m = q_m \pi d \left(l f_r + \frac{d}{4} \right). \quad (7)$$

Формулы (1)–(3) дополняют математическую модель процесса гидропрессовой сборки при подводе масла с торца вала.

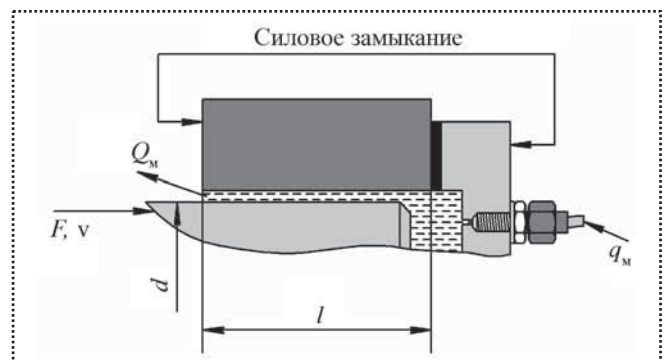


Рис. 3. Схема гидропрессовой сборки при подводе масла с торца вала

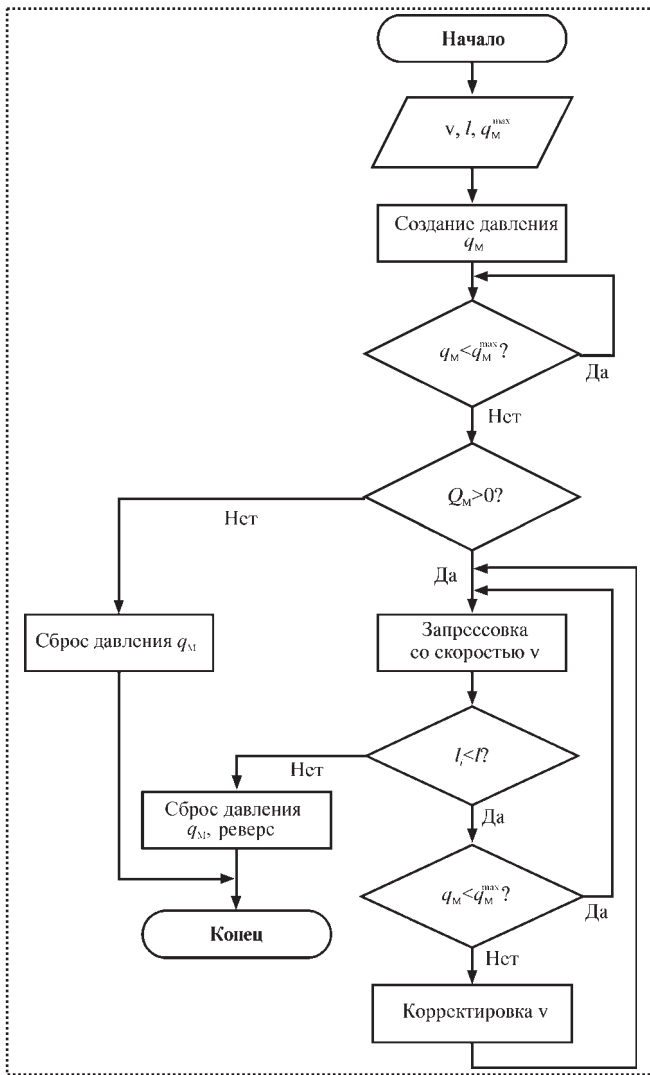


Рис. 4. Схема управляющего алгоритма гидропрессовой сборки при подводе масла с торца вала

Управляющий алгоритм процесса гидропрессовой сборки при подводе масла с торца вала представлен на рис. 4.

В отличие от алгоритма, приведенного на рис. 2, система управления регулирует скорость запрессовки v , обеспечивает постоянство рабочего давления масла q_M и тем самым режим жидкостного трения.

Особенностью представленной на рис. 3 технологической схемы является избыточный объем масла, что требует значительного времени для его протекания через зазор. Одним из путей устранения этого недостатка является применение дифференциального способа [1]. При этом управляющий алгоритм гидропрессовой сборки не изменяется.

Другим способом сокращения времени запрессовки является управляемое дросселирование избыточного объема, что вызывает необходимость введения в алгоритм дополнительного контура управления дросселем.

Технические аспекты автоматизации гидропрессовой сборки

Изложенные математические модели и алгоритмы регулируют процесс жидкостного трения и образования масляной прослойки между контактирующими поверхностями.

Необходимо иметь в виду, что движение масла происходит не только в зоне контакта, но и в подводящих трубках, клапанах, уплотнениях и других устройствах, входящих в состав гидравлической схемы. Кроме того, высокие давления рабочей жидкости вызывают в них реологические изменения, а также значительные упругие деформации элементов конструкции.

Следовательно, расчетные значения параметров γ , η , F_T , f_T , v_T должны подвергаться корректировке, а коэффициенты регулирования управляемых параметров должны иметь достаточный запас. Диапазон изменения коэффициентов регулирования также будет зависеть от типа регулятора и его технических характеристик.

Важными являются проблемы управления насосами и дросселями высокого давления из-за высокой чувствительности расхода масла и величины деформации элементов конструкции. Алгоритм управления такими устройствами требует дополнительного анализа для каждого конкретного случая.

Выводы

1. Приведенные математические модели движения жидкости в кольцевом зазоре заимствованы из классической гидродинамики без учета деформируемости стенок трубопроводов и элементов конструкции и комплексного влияния высокого давления и температуры жидкости на ее реологические свойства, что требует разработки более точных гидромеханических моделей гидропрессовой сборки и экспериментального определения коэффициентов регулирования системы управления.

2. Выбор типа системы управления – следящий, адаптивный или с искусственным интеллектом – зависит не только от требований производительности и качества гидропрессовой сборки, но и степени влияния деформаций элементов конструкции, точности и плавности работы измерительной и регулирующей аппаратуры, а также возможностей программно-аппаратных средств самой системы управления.

Библиографический список

- Абрамов И.В. Исследование и совершенствование гидропрессового метода сборки соединений с натягом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Пермь, 1970. 20 с.
- Абрамов И.В. Эффективность работы бумагоделательных машин. М.: Лесная промышленность, 1984. 120 с.
- Абрамов И.В., Щенятский А.В., Федоров В.Б., Сивцев Н.С., Соснович Э.В. Эволюция гидропрессовой сборки // Интеллектуальные системы в производстве. 2008. № 1. С. 133–153.
- Абрамов И.В., Абрамов А.И., Синицын А.Н., Синицына В.В. Теоретическое обоснование новых способов сборки и разборки соединений с натягом // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2011. № 3. С. 11–15.

УДК 658.527.011

А.А. Иванов, д-р техн. наук (Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)
E-mail: ivanov_aa@nntu.nnov.ru

Промышленные роботы в сборочном производстве

Приведены примеры использования промышленных роботов в сборочном производстве, структура которого определяется организационной формой технологического процесса сборки: стационарная (в виде сборочного центра) или подвижная (в виде сборочной линии).

Some examples of using industrial robots in assembling production are given in this article. Its structure is determined by the organizational form of the technological process of assembly: fixed (as an assembling center) or movable (as an assembling line).

Ключевые слова: промышленный робот, сборочное производство, сборочный центр, сборочная линия.

Keywords: industrial robot, assembling production, assembling center, assembling line.

Структура сборочных систем во многом определяется организационной формой технологического процесса сборки, которая может быть стационарной или подвижной.

Основными факторами, определяющими организационную форму автоматической сборки, являются:

- конструктивно-технологическая характеристика объектов сборки;
- тип производства;
- годовая программа выпуска изделий;
- длительность сборочного цикла;
- трудоемкость сборки объекта.

Стационарная сборка обычно реализуется в виде сборочного центра (СЦ), в состав которого входят:

- сборочная головка (СГ);
- устройство загрузки-выгрузки (УЗВ);
- транспортная система (ТС);
- операционный накопитель;
- система управления (СУ).

Классическая компоновка СЦ для сборки минимального узла из двух деталей представлена на рис. 1. Для сборки более сложных узлов эволюция этого СЦ идет в направлении увеличения постов загрузки, числа ПР, оснащения центра накопителем сменного инструмента и т.п. (рис. 2).

Характерным примером сборочного центра в приборостроении является роботизированный комплекс для монтажа корпусных интегральных микросхем

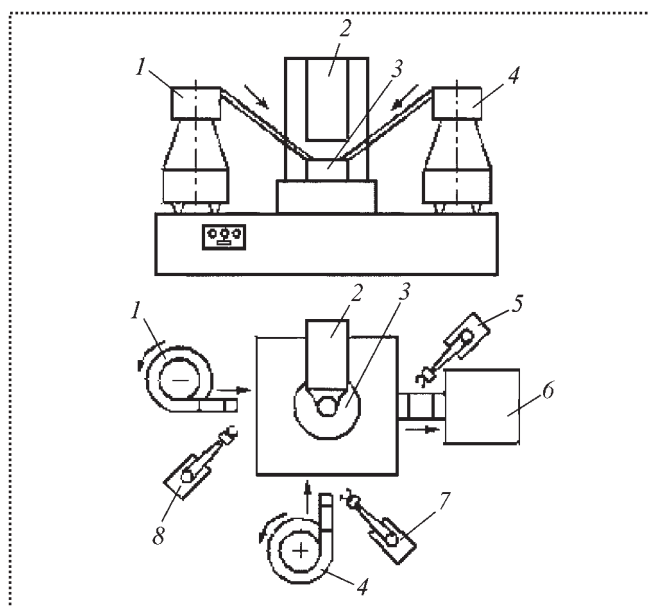


Рис. 1. Компоновка сборочного центра для сборки минимального узла из двух деталей:

1, 4 – бункерные загрузочно-ориентирующие устройства; 2 – сборочная головка; 3 – устройство базирования деталей; 5 – разгрузочный робот; 6 – накопитель собранных узлов; 7, 8 – загрузочные роботы

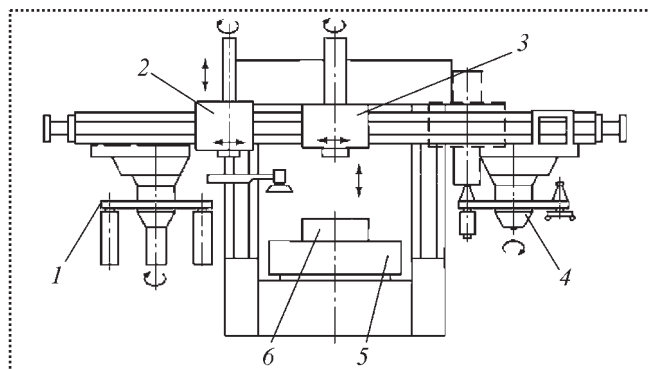


Рис. 2. Компоновка сборочного центра с магазинами деталей и инструментов:

1 – магазин деталей; 2 – загрузочный робот; 3 – сборочная головка; 4 – магазин инструментов; 5 – поворотный стол; 6 – устройство базирования деталей

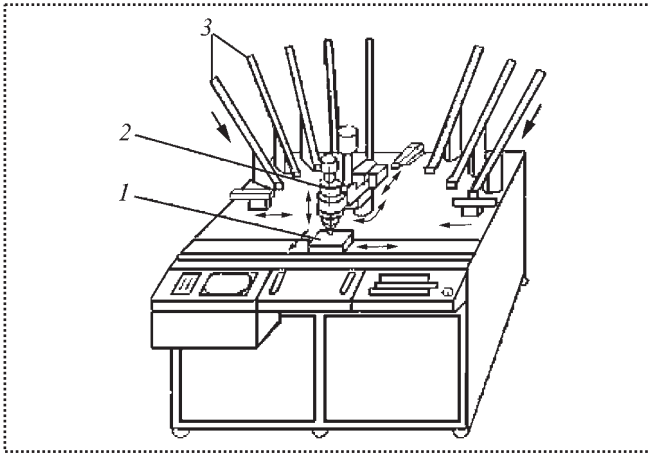


Рис. 3. Роботизированный комплекс для монтажа корпусных ИМС со штырьковыми контактными выводами на печатную плату:
 1 – печатная плата; 2 – сборочный робот; 3 – пеналы с ИМС

(ИМС) со штырьковыми контактными выводами на печатную плату 1 (рис. 3). Накопителями ИМС служат пластмассовые пеналы 3 емкостью 50 приборов. Монтаж ИМС на печатную плату ведет сборочный робот 2 типа "Пума" (США), внешний вид которого показан на рис. 4.

Для *подвижной сборки* характерна поточная форма организации технологического процесса, которая реализуется в виде комплексно-механизированной или автоматической сборочных линий (СЛ).

Структура СЛ во многом определяется типом транспортной системы: с вертикально или горизонтально замкнутым конвейером, с тактовым или непрерывно движущимся конвейером, со спутниками или без спутников, с межоперационными накопителями или без накопителей.

В массовом производстве (например, в автомобильной промышленности) в мировой практике наиболее распространена подвижная сборка с непрерывно дви-

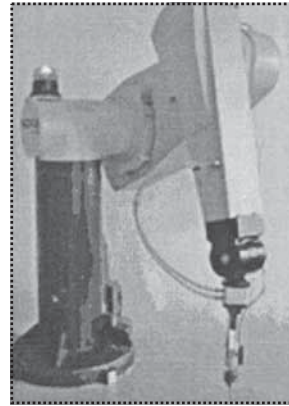


Рис. 4. Сборочный робот типа "Пума" (США)

жущимся конвейером, на котором реализуется принцип разделения труда (каждый оператор выполняет только свою операцию). Однако в линиях сборки-сварки кузовов и кабин автомобилей применяют, как правило, вертикально замкнутый конвейер (рис. 5).

Структура линий сборки-сварки цельнометаллических кузовов автомобилей "ГАЗель" базируется на типовых сборочных ячейках с набором унифицированных узлов. Типовые ячейки линий сборки-сварки кузовов автомобилей данного семейства моделей включают:

- сварочный робот;
- спутниковый вертикально замкнутый конвейер;
- транспортно-загрузочный подвесной манипулятор;
- поворотный стол с тележкой;
- поворотный стол (рис. 6).

Грузоподъемность конвейера – 1 т, точность позиционирования $\pm 0,5$ мм, габариты спутника – 5×2 м. Время выстоя $t_{\text{в}}$ конвейера (и, следовательно, время такта $t_{\text{т}}$) устанавливают в зависимости от числа точек сварки n и тактового времени $t_{\text{т.св}}$ на одну сварочную точку: $t_{\text{в}} = n t_{\text{т.св}}$.

Структура линий сборки-сварки кузовов семейства легковых автомобилей в принципе аналогична указанной. Сборочная линия сборки-сварки основания кузова состоит из трех ветвей:

- первая ветвь – сборка переднего пола;
- вторая ветвь – сборка заднего пола;
- третья ветвь – сборка основания в целом (рис. 7). Производительность линии – 29 оснований

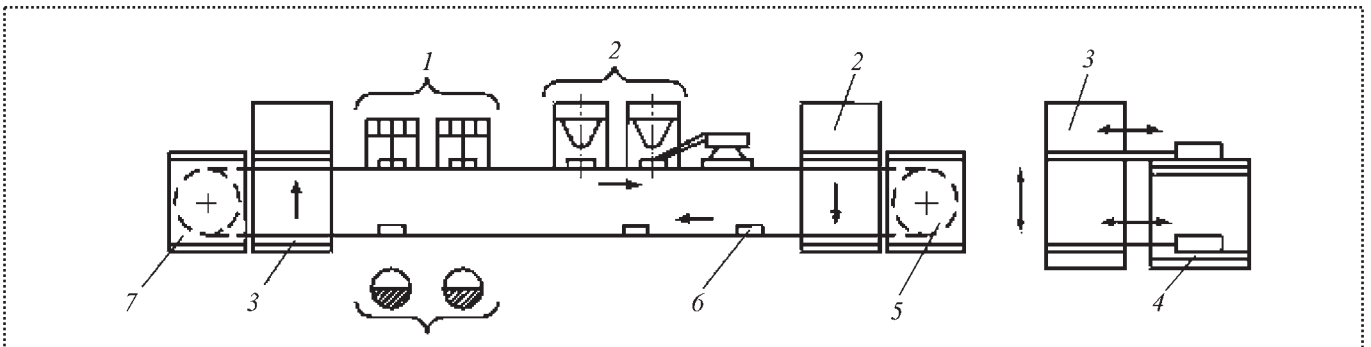


Рис. 5. Схема вертикально-замкнутого тактового конвейера спутников сборочной линии:

1 – автоматизированное рабочее место; 2 – автоматический сборочный пост; 3 – лифт; 4 – конвейер; 5 – привод конвейера; 6 – спутник; 7 – реверс конвейера

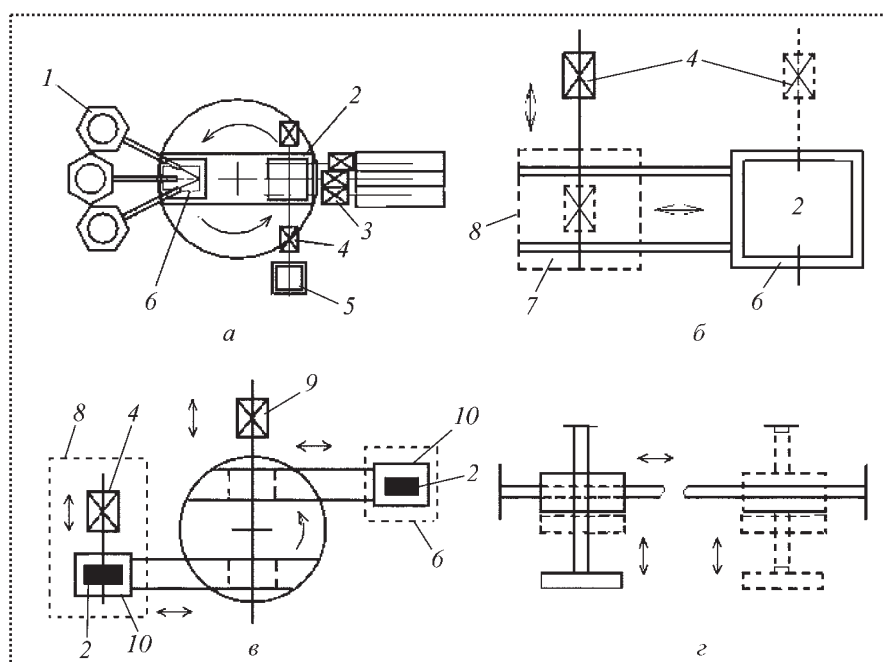


Рис. 6. Схемы типовых унифицированных узлов линии сборки-сварки кузовов:

a – поворотный стол; *б* – выкатная тележка; *в* – поворотно-выкатной стол; *г* – подвесной транспортно-загрузочный манипулятор; 1 – сварочный робот; 2 – сварочный кондуктор; 3 – накопитель конвейерного типа; 4 – загрузочный манипулятор; 5 – накопитель стеллажного типа; 6 – позиция сварки; 7 – позиция загрузки; 8 – тележка; 9 – транспортно-загрузочный манипулятор; 10 – выкатной стол

в час при коэффициенте использования линии $\eta = 0,8$. На позицию сварки технологический спутник поступает с основанием кабины.

Структуру линий сборки навесных агрегатов двигателя внутреннего сгорания рассмотрим на примере сборки электровентиляторов.

Разработка подобных линий связана с концепцией создания модульных систем для определенной группы технологических операций, которые способны приспособиваться к смене объектов сборки и перенастраиваться на выпуск новой продукции (для группы сходных узлов).

Сборка электровентиляторов нескольких типов производят на гибкой СЛ с горизонтально замкнутым конвейером спутников и двумя универсальными роботами "Сигма" с тремя манипуляторами у каждого (рис. 8). Сборочные роботы (СР) связаны друг с другом стандартными модулями-транспортёрами фирмы Оливетти. Для выполнения всех операций сборки используют два типа захватов. Тактовое время СЛ составляет $t_T = 9$ с.

На спутнике главного конвейера вертикально размещены

корпус и ротор электродвигателя вентилятора. Спутник перемещается по конвейеру силами трения, что позволяет останавливать и фиксировать его на упоре.

Распределение операций между манипуляторами СР "Сигма" следующее:

- первый манипулятор надевает прокладку на ось ротора, расположенного на спутнике вспомогательного конвейера, затем устанавливает ротор на спутник с корпусом двигателя;
- второй манипулятор устанавливает прокладку и замок, затем надевает корпус на ось ротора (на одном спутнике);
- третий манипулятор устанавливает щеткодержатель, снимая его со спутника вспомогательного транспортера.

На первой позиции производится сборка бандажа электродвигателя. На второй позиции двигатель прокручивается вхолостую для приработки его частей. На третьей позиции замеряется уровень шума и рабочий ток двигателя, для чего первый манипулятор переносит двигатель в звуконепроницаемую камеру. При отрицательном результате проверки бракованный двигатель снимается со спутника, а при положительном – второй манипулятор вставляет в отверстие оси ротора шпильку для передачи вращения крыльчатке, которую затем устанавливает на ось. Третий манипулятор вставляет пружину, фиксирующую крыльчатку, и собранный двигатель переносит на позицию выходного контроля. На контроле проверяют: скорость при нагрузке; механическую балансировку; рабочий ток при нагрузке. Если все контролируемые параметры в норме, то собранный вентилятор выгружается из спутника на отводящий транспортер.

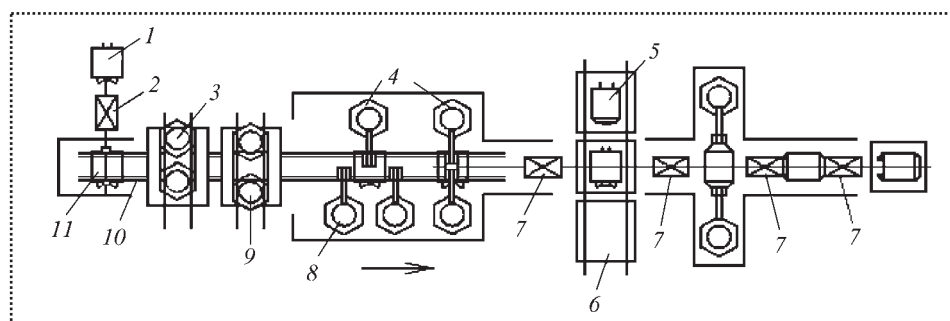


Рис. 7. Структура линии сборки-сварки основания кузова:

1 – АРМ прихватки; 2 и 3 – загрузочный и подвесной роботы; 4 и 9 – робототехнический комплекс с напольным и подвесным сварочным роботом; 8; 5 – выкатная тележка; 6 – позиция загрузки передка; 7 – подвесной транспортный робот; 10 – рейферная транспортная система; 11 – позиция загрузки

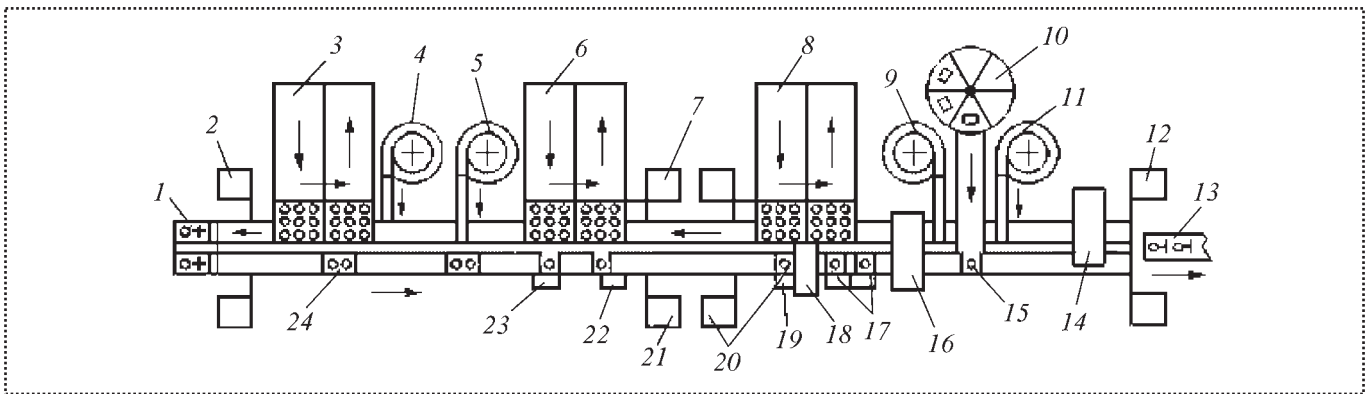


Рис. 8. Структура гибкой линии сборки электровентиляторов системы охлаждения двигателей автомобилей:

1 – спутник с корпусом; 2 – установка корпуса на спутник; 3, 6, 8 – кассетные накопители с роторами, щеткодержателями и бандажами соответственно; 4, 5, 9, 11 – загрузочные устройства прокладок, замков, шпилек и пружин крыльчатки соответственно; 7 – позиция установки щеткодержателей; 10 – накопитель крыльчаток; 12 – позиция перегрузки собранных двигателей с линии на отводящий конвейер; 13 – отводящий конвейер; 14 – позиция динамической балансировки ротора, замера тока при нагрузке; 15 – установка шпильки и пружины; 16 – позиция замера уровня шума и тока без нагрузки; 17 – позиция холостой прокрутки электродвигателя; 18 – позиции затяжки крепежа бандажа; 19 – позиция контроля изоляции; 20 – позиция установки бандажа; 21 – позиция установки корпуса на ротор; 22 – позиция контроля прочности присоединения выводов щеткодержателя; 23 – кантователь корпуса с ротором на спутнике на 180°; 24 – установка ротора на спутник

В электронном приборостроении сборочные линии часто формируют из унифицированных модулей, включающих:

- горизонтально замкнутый конвейер спутников;

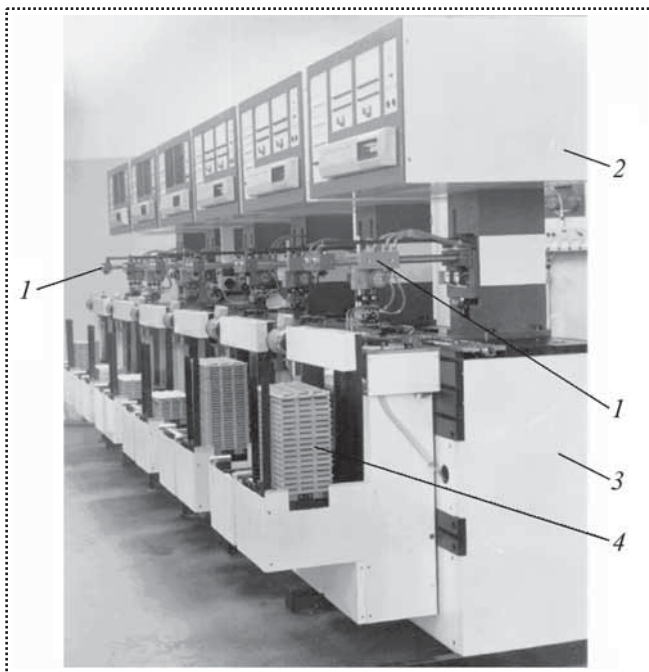


Рис. 9. Внешний вид линии модульного типа с кассетными накопителями деталей для сборки металлокерамических корпусов ИМС:

1 – загрузочный (или сборочный) робот; 2 – система управления; 3 – унифицированный сборочный модуль; 4 – кассетный накопитель

- загрузочный и сборочный (при необходимости) роботы;

- бункерные или кассетные накопители деталей;
- сборочную головку;
- локальную систему управления [1, 2].

Линия модульного типа для сборки металлокерамических корпусов ИМС представлена на рис. 9.

При сборке металлокерамических корпусов используют спутники из специальной керамики, поскольку соединение деталей корпусов осуществляется в водородной печи методом высокотемпературной пайки. С целью повышения производительности в сборочных комплексах применяют двухместные технологические спутники, которые в свою очередь вкладываются в унифицированные транспортные спутники.

Подобные линии модульного типа применяют для сборки часов, электросоединителей (штепсельных разъемов), печатающих головок струйных принтеров, датчиков различных типов и т.п.

Вывод

Приведенные примеры показывают техническую и экономическую целесообразность использования промышленных роботов в сборочном производстве, структура которого определяется организационной формой технологического процесса сборки: стационарная (в виде сборочного центра) и подвижная (в виде сборочной линии).

Библиографический список

1. Иванов А.А. Автоматизированные сборочные системы: учебник. М.: Форум, 2012. 336 с.
2. Иванов А.А. Основы робототехники: учеб. пособие. М.: Форум, 2012. 224 с.



УДК 621.9:621.3

Р.Р. Магдиев, канд. техн. наук (Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий механики и оптики – НИУ ИТМО)
E-mail: rmagdy@mail.ru

Опыт построения моделей технологической системы механосборочного оптико-электронного мелкосерийного производства

Предложены модели для описания производства оптико-электронной аппаратуры, обладающие высокой гибкостью, адаптивностью и возможностью переконфигурации структуры технологического процесса под соответствующую изменяемую номенклатуру изделий.

There are offered for attention models for describing electronic-optical apparatus production, in possession of high flexibility, adaptability and possibility of rearrangement technological process structure according to listed products changes.

Ключевые слова: модель технологической системы, модель (минимодель) операций, опции для монтажа, агрегативный подход, имитационная модель, объектно-ориентированная модель.

Keywords: model of a technological system, model (mini-model) operations, options for mounting, aggregative approach, simulation model, object-oriented model.

Оптико-измерительные приборы основаны на взаимодействии электромагнитных волн оптического диапазона ($3 \cdot 10^{11} \dots 3 \cdot 10^{17}$ Гц) с электронами в веществах и использованием этих эффектов для генерации, передачи, хранения, обработки и отображения информации.

Постоянная миниатюризация электронно-оптической аппаратуры ведет к уменьшению входящих в нее компонентов и, соответственно, новому направлению развития, например, по отказу от корпусов и применению кристаллов и микрооптики. В технологии сборки возникает много проблем, связанных с оборудованием для монтажа компонентов и микросборок оптических систем. Особенностью российских предприятий являются: широкая номенклатура, небольшие партии "запуска-выпуска", специальное назначение, которые диктуют особые требования к гибкости производства.

Значительные трудности возникают при мелкосерийном и единичном изготовлении приборов, так как трудоемкость сборочных работ достигает 50 % общей трудоемкости производства из-за ручных пригоночно-доводочных операций. Для экономичности сборки как однотипных, так и разнотипных изделий производительность сборочного оборудования должна быть выше, чем у человека, совершающего рабочие движения со скоростью до 4,7 м/с. При разработке нового сборочного оборудования необходимо, чтобы производительность приближалась к лучшим автоматическим сборочным машинам крупносерийного или массового производства изделий, а затраты на его создание и эксплуатацию были бы минимальными. При использовании автоматизированных комплексов, в том числе гибких роботизированных сборочных комплексов, например,

для монтажных работ сборки печатных плат и технологических элементов замены (ТЭЗ), производительность операций сборки повышается. С применением этих комплексов проще и быстрее взять, сориентировать и установить отдельные присоединяемые элементы, чем переместить плату от одной сборочной позиции к другой. Собираемые элементы однотипны и поэтому решается вопрос ориентации, базирования и соединения. При мелкосерийном типе производства необходимо с высокой точностью базировать деталь или комплектующее изделие, вывернуть перед установкой относительное положение соединяемых элементов различных конфигураций и размеров, организовать их ориентацию и подачу к месту установки с обеспечением точности позиционирования. Главная проблема автоматической сборки – это быстрая и безубыточная переналадка с одного вида на сборки другой, например, использование приспособлений-спутников, поворотных управляемых столов, ориентации с помощью эффекта ЭМАГО, ориентирующих направляющих накопителей, а также самопереналадки, адаптивной групповой оснастки и контроля за положением собираемых (сочленяемых) поверхностей.

На кафедре приборостроения НИУ ИТМО происходит освоение сборочного центра XXI в. по сборке оптических объектов и окуляров.

Оборудование "сборочного центра" должно обеспечивать:

- установку кристаллов на клей;
- припой или микросварку;
- сборку гибридных и многокомпонентных модулей;
- монтаж "перевернутых" кристаллов или устройств типа "чип на плате" (COB);
- микроволновые, ультразвуковые и оптические технологические операции и переходы.

Сборочное оборудование, как правило, высокого качества, с его помощью можно решать сложные технологические задачи по установке сверхтонких кристаллов, сборку лазерных диодов и осуществлять электрический монтаж.

В условиях мелкосерийного производства, когда общее число заказов невысоко, а номенклатура и тип изделий постоянно меняются, единственным правильным выбором становятся гибкие, перестраиваемые производственные системы сборки, которые могут решать широкий спектр задач по освоению новых технологий, проведению исследовательской деятельности и обучению персонала.

Ручные и автоматизированные установки монтажа кристаллов типа Т-3000-М/Т-3002-М (FC3) имеют высокую производительность, эргономичность и надежность, приспособлены для нужд мелкосерийного производства и изготовления опытных образцов изделий.

Время полного цикла установки одного компонента составляет 4 с и позволяет осуществлять монтаж любых SMD-компонентов и гибридных микросборок, наносить паяльную пасту и адгезивы, а также монтировать кристаллы прямо с полупроводниковых пластин, заполнять магазины типа GelPack или WafflePack.

Ручные установки дополнены автоматизированным приводом перемещения по вертикальной оси, обеспечивающим по-



вторяемое и контролируемое усилие монтажа. Также используют ультразвуковые устройства или устройства монтажа на эвтектику. Эти установки применяют для монтажа кристаллов на эвтектику при освоении изделий в производстве. Но основное достоинство линеек и обрабатывающих центров, построенных на основе этих установок – гибкость перемещения сборочного инструмента по вертикали благодаря управляемому автоматическому приводу. При этом обеспечивается повторяемость операции, необходимая, например, для приборов, основанных на СВЧ-транзисторах. Указанные установки модернизированы, оснащены автоматизируемой системой управления (на базе ПЭВМ) и обеспечивают управление автоматизированными приводами точного перемещения в горизонтальной и вертикальной плоскостях.

Предлагаемые модели обладают высокой гибкостью и возможностью перекомпоновки с доработанием функций путем простого добавления опций на базовую модель оборудования. Особенностью в оборудовании является уникальный выталкиватель, захватывающий компоненты и кристаллы с полупроводниковых пластин и лент питателей без синхронизации иглы выталкивателя и вакуумной головки, а также способный вести сборку со сверхтонкими кристаллами без повреждений.

Мини-питатель, подающий компоненты поверхностного монтажа под вакуумный захват, расширяет область применения до установки чип-резисторов и микросхем, повышая тем самым функциональность устройства. Номенклатура прецизионных нагревательных столиков для монтажа на эвтектику позволяет применять технологию монтажа чувствительных арсенид-галлиевых кристаллов, с одновременной возможностью открытой и закрытой подачи инертных газов в контур нагрева, что повышает качество эвтектической сборки.

Специальные насадки для захвата компонентов различной формы позволяют одинаково бережно выполнять операции сборки как с простыми кремниевыми кристаллами, так и с длинными и хрупкими кристаллами оптико-измерительных приборов. Комплект опций для монтажа "перевернутых" кри-

сталлов (flip-chip) позволяет с высокой точностью проводить совмещение и монтаж многовыводных кристаллов, в том числе с захватом их из полупроводниковых пластин при помощи выталкивателя "TRESKY". Для этого установки оснащены специальным автоматизированным столиком, который расположен под рабочей областью установки и в момент захвата компонента выдвигается под вакуумную головку. Автор спроектировал и изготовил оригинальные сборочно-монтажные роботизированные комплексы и получил авторские свидетельства на изобретения.

До разработки технологических процессов сборки выполняют комплекс взаимосвязанных работ: определение ресурсного обеспечения, выбор структуры с распределенными элементами и вида технологического процесса, подбор аналога ранее разработанному унифицированному (групповому) технологическому процессу сборки. Работу, не обеспеченную ресурсами, передают соисполнителям по кооперации.

Далее определяют последовательность и содержание технологических операций, с назначением технологического оборудования, сборочного инструмента, оснастки и средств автоматизации технологического процесса. Затем назначают параметры сборки, нормируют процесс и определяют квалификацию исполнителей, а также рассчитывают производственные участки и разрабатывают операции перемещения изделий и узлов с выбором транспортно-складских средств. Сборочные участки моделируют как общий сборочный стенд или общий сборочный центр, состоящий из сборочного оборудования, в том числе сборочных центров, ручных и автоматизированных рабочих мест сборки, включая испытательные установки и стенды. Этот подход является новизной в исследовательской работе.

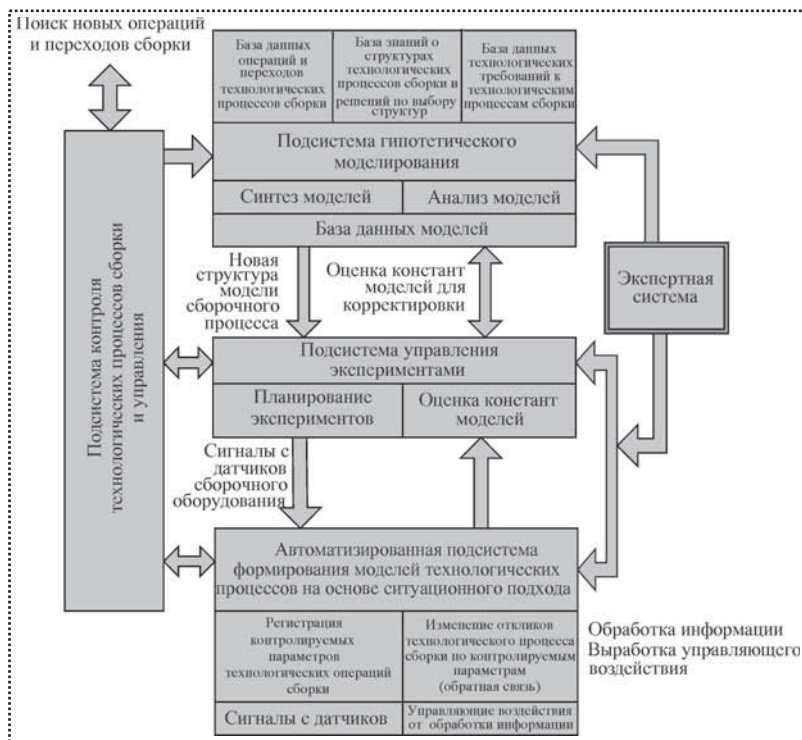
Проектирование моделей для изготовления сложных приборов основано на идее представления сборочного производства в виде общего обрабатывающего центра с различным сочетанием и перестановкой операций в структуре технологического процесса.

Необходимость создания моделей определяется спецификой и сложностью технологических процессов сборки. На основе тщательных экспертиз специализированными организациями была определена непригодность готовых моделей для изготовления сложных приборов из-за наличия различных физических операций, чрезмерно высокой точности сопряжений, настроек и регулировок, а также необходимости проведения испытаний и измерений.

Поэтому на основе обсуждений потребностей промышленности и дальнейшего совершенствования технологических процессов сборки была предложена концепция, поставлена задача и принято решение на государственном уровне о создании программы поддержки развития оптико-измерительной техники. В этой программе предусмотрена разработка моделей, технологических инновационных решений сборки и формирование баз данных, включая базы знаний, обеспечивающих интеллектуальную составляющую для современного приборостроения.

Для этой цели были собраны данные исследований сложных систем о потребности в приборах и системах контроля, наличии инновационных производственных процессов сборки, обобщены и формализованы статистические данные, которые легли в основу решения выявленных проблем.

Особенностью математических моделей в производственном процессе оптико-измерительных приборов нового поколения является наличие динамического, системного, статистического, имитационного и экспериментального аспектов, вызванных использованием уникальных современных средств и используемых методов.



Обобщенная структура многофакторной модели гипотетических технологических систем сборки сложных приборов



Динамический аспект заключается в рассмотрении требований по управлению сборочным процессом на основе установленных параметров, фиксации их изменения, что образует динамическую картину, а не статическую, как у существующих моделей. При этом исследуется процесс сборки, изменяющий свои характеристики в реальном масштабе времени под воздействием внешних причин (входные сигналы) и внутренних (качественные) свойств.

Системный аспект обеспечивает имитацию сборки операций и переходов в сложной технологической системе на основе деления ее на подсистемы, а подсистемы, в свою очередь — на элементы с установлением связей, которые могут находиться в различных ситуациях. Это обеспечивает получение оперативной информации о действии подсистемы, состоянии ее частей и элементов, а также всей системы в целом. Так как число элементов и их связей очень велико, то имитация является единственным способом получения оптимальных решений.

Статистический аспект необходим в качестве исходных данных, ввиду дискретности операций сборки в реальном масштабе времени, необходимости их фиксации и измерения параметров, необходимых для управления системой во времени и пространстве. Используют также режимы и логические способы управления измерительной аппаратурой для получения отклика объекта сборки на контролируемые возмущения.

При имитации в модель вводят установленные значения параметров в виде случайных чисел с известными законами распределения и фиксируют их в виде статистических данных. Затем строят искусственный вероятностный процесс, среднее значение которого является ответом на поставленную задачу.

Специфический *имитационный аспект* моделирования заключается в операционном, алгоритмическом описании процесса сборки в математической форме, предназначенной для воспроизведения полученной модели при помощи операционной системы ЭВМ, с сохранением логической структуры моделируемого сборочного процесса. Воспроизведение имеет численные решения, а описание носит ярко выраженный рекуррентный характер.

Экспериментальный аспект заключается в проведении экспериментов на модели по формированию структуры технологического процесса сборки реального изделия, с использованием диалога человека и модели. Достоинство данного подхода (по сравнению с натурными) заключается в воспроизводимости, варибельности, сокращении времени и т.п.

Введение модели в производственную систему сборки и проведение многократного моделирования обеспечивают технические и программные средства. Математическое описание технологического процесса сборки связано со сложностью описания объекта, потребностью формализации, оценки адекватности и проведения эксперимента, а также использование математического аппарата как качественного метода в теории систем.

Агрегативный подход в моделировании автоматизированной системы управления переносится в разработку модели сборочного процесса и становится основой агрегативного моделирования для производственного процесса сборки приборов.

Исследовательская работа включает разработку методики и технологии построения моделей по разработке технологических процессов сборки оптико-измерительных приборов с их многократным использованием с разной структурой связей. Этот подход обеспечивает множество вариантов структуры сборки.

Решение этих задач обеспечивается единой математической схемой, выполняющей одновременно следующие функции:

- концептуального описания исследуемых объектов;
- формального основания для создания программ имитации;

- математической основы программ обработки и анализа результатов моделирования;

- объекта производственного процесса сборки.

Этим требованиям удовлетворяет математический метод кусочно-линейного агрегата, который положен в основу агрегативного моделирования сложных многофункциональных моделей сборки и служит универсальной формой создания моделей. Это позволяет унифицировать алгоритм имитации, методы обработки и анализа результатов моделирования, а также охватывает широкий класс задач теории сложных систем. Подсистема моделирования включает базы данных моделей, элементов структур, базу знаний и базы данных технических требований технологических процессов сборки.

На первом этапе моделирования на основе исходных данных сборочной системы оптико-измерительных приборов учитывают или устанавливают:

- основные требования к моделируемому объекту сборки;
- назначение модели;
- общие предположения о путях решения поставленной задачи и адекватности модели;
- степень универсальности модели;
- информацию о форме представления результатов моделирования и о возможных вариантах проведения испытаний модели.

На втором этапе разработки модели формируют описание сборочной системы и осуществляют выбор математического аппарата, а также методы и требования по адекватности разрабатываемой модели. Выделяют существенные и несущественные свойства, отображаемые в модели, разбивают параметры и переменные значения на входные и выходные, формируют описания процессов преобразования сигналов в сборочной системе.

Аналитическая модель сборочной системы, показанная на рисунке, основана на функциональном описании конструкции оптико-измерительных приборов и групповых технологических процессов и выражает зависимости, существующие между целевой функцией (или показателями эффективности ее реализации), входными внешними сигналами и внутренними параметрами структуры сборочных процессов, фазовыми переменными структурами, внешними выходными параметрами.

Библиографический список

1. **Бабушкин А.А.** Моделирование процесса сборки в сборочных приспособлениях самолетных конструкций. Москва—Харьков: Национальный Аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского (ХАИ), 2010. 464 с.
2. **Белецкая С.Ю.** Формирование комплексной модели производственной системы на основе интеграции case-технологии и имитационных процедур. М.: Диалог—МИФИ, 2004. 110 с.
3. **Магдиев Р.Р.** Алгоритм расчета параметров групповых сборочных процессов в многономенклатурном производстве // Металлообработка. 2010. № 6. С. 14—17.
4. **Шалобаев Е.В.** Исследование и разработка методики проектирования автоматизированной сборки электронных узлов в приборостроении // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2002. № 1. С. 39—40.

УДК: 629.488.27 [53.082.4+62-233.2]

В.Н. Костюков, д-р техн. наук, профессор, **А.В. Костюков**, канд. техн. наук,
А.В. Щелканов, инженер (НПЦ "Динамика", г. Омск)
E-mail: post@ynamics.ru

Стендовая система ультразвукового контроля вкладышей подшипников скольжения КОМПАКС-УЗД

Предложена система ультразвукового контроля вкладышей подшипников скольжения, основанная на иммерсионном эхо-импульсном методе контроля, позволяющая автоматически выявлять такие дефекты, как расслоение, несплошности в корпусе и в заливке, продольные трещины.

The ultrasonic control system of plain bearings shells, based on immersion echo-pulse control method, is discussed. This system allows to detect automatically such defects as exfoliation, discontinuity flaws in the case; discontinuity flaws in pouring; longitudinal cracks.

Ключевые слова: система, ультразвуковой контроль, дефекты подшипников скольжения.

Keywords: system, ultrasonic control, plain bearings defect.

Подшипники скольжения являются одними из наиболее критичных узлов. Выход данного узла из строя сопровождается локальным перегревом, наклепом баббита на вал, задиром шейки вала и заклиниванием последнего. Ремонт таких узлов достаточно трудоемкий и требует больших временных затрат. Чтобы избежать дорогостоящих и продолжительных ремонтов, необходимо контролировать качество данного узла, как в процессе эксплуатации, так и в процессе ремонта и обслуживания.

Диагностирование данного узла в процессе эксплуатации методами вибродиагностики может осуществляться, например, с помощью стационарной системы КОМПАКС® [1, 2], либо переносной системы Compac®-micro [3].

В процессе ремонта и обслуживания обычно проверяют геометрические параметры узла, такие как овальность, зазоры и т.д. Однако геометрия деталей узла не может являться полноценным критерием оценки качества, поскольку не позволяет обнаруживать скрытые дефекты. Одними из самых "опасных" деталей являются вкладыши подшипников скольжения. Наиболее распространенные — двухслойные вкладыши, которые состоят из жесткого прочного корпуса и антифрикционной заливки.

Статистика показывает, что чаще всего среди дефектов вкладышей встречается расслоение (отставание слоя заливки от корпуса) и несплошности (воздушные пузырьки, шлаковые включения). Опасность данных дефектов заключается в том, что дефектный вкладыш может выйти из строя неожиданно и при этом разрушение узла произойдет очень быстро. Для выявления данных дефектов была создана стендовая система ультразвукового контроля качества вкладышей подшипников скольжения КОМПАКС®-УЗД 7609 (далее — система).

Первая система была создана в 2002 г. и внедрена на Омском нефтеперерабатывающем заводе, где на ремонтном производстве самостоятельно изготавливают и ремонтируют вкладыши. В данной системе использован контактный эхо-импульсный метод диагностирования, который позволил автоматически контролировать заготовки вкладышей и обнаруживать следующие дефекты:

- расслоение;
- несплошности в корпусе;
- несплошности в заливке;
- продольные трещины.

Опыт эксплуатации подтвердил необходимость системы на производстве, а также показал ее основные преимущества:

- высокая достоверность диагностирования (разработанное программное и аппаратное обеспечение позволяет выявлять дефекты размером от 2 мм²);
- полностью автоматический процесс диагностирования (оператор только устанавливает вкладыш и датчик);
- возможность сохранения и печати протоколов диагностирования;
- возможность печати дефектограммы, что позволяет точно определять дефектную область для дальнейшего ремонта;
- возможность редактирования базы данных типов вкладышей и материалов.

В 2006 г. система получила дальнейшее развитие — КОМПАКС®-УЗД 7615. Внешний вид системы приведен на рис. 1.

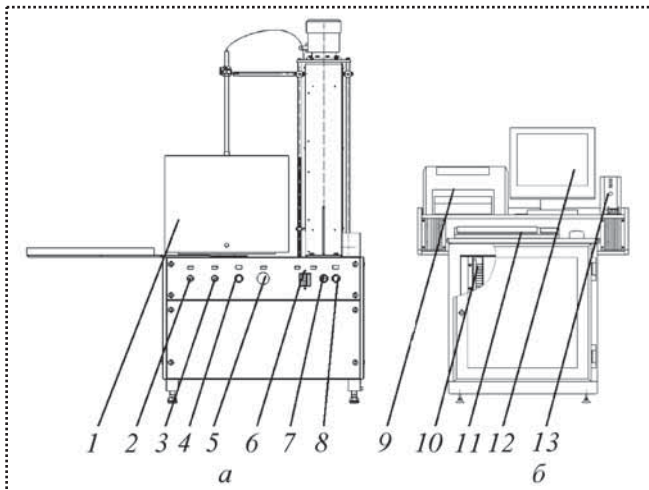


Рис. 1. Внешний вид системы КОМПАКС®-УЗД 7615:
а – стенд: 1 – бак; 2 – индикатор "Сеть"; 3 – индикатор "Датчик"; 4 – кнопка "Пуск"; 5 – кнопка "Стоп"; 6 – автомат "Вкл"; 7 – кнопка "Вниз"; 8 – кнопка "Вверх";
б – диагностическая станция: 9 – принтер; 10 – диагностический контроллер; 11 – клавиатура; 12 – дисплей цветной; 13 – блок бесперебойного питания

При разработке новой системы были улучшены характеристики предыдущей системы, а также учтены пожелания заказчиков. Данная система основана на иммерсионном эхо-импульсном методе ультразвуковой диагностики. В качестве иммерсионной жидкости используется обычная вода. Новое программно-аппаратное решение позволило в 2,5 раза увеличить скорость диагностирования и повысить точность распознавания дефектов за счет реализации усовершенствованных алгоритмов диагностирования. Кроме того, иммерсионный метод диагностирования позволил диагностировать вкладыши со сложной геометрией (пример профиля вкладыша приведен на рис. 2).

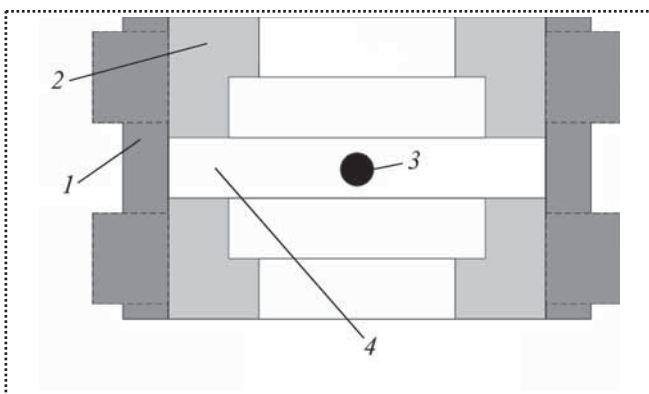


Рис. 2. Профиль вкладыша со сложной геометрией:
 1 – основание; 2 – баббит; 3 – масляный канал; 4 – масляный холодильник (прямоугольная проточка по окружности вкладыша)

Система позволяет дополнительно контролировать отклонение толщины корпуса и заливки от номинальных значений. Результирующая информация представляется в виде дефектограммы и текстового протокола на экране или в распечатанном виде.

Основные технические характеристики системы:

- геометрические параметры диагностируемых вкладышей:

минимальный внутренний диаметр вкладыша, мм	60
максимальный внешний диаметр вкладыша, мм	420
ширина рабочей зоны вкладыша, мм	12...360
толщина слоя заливки, мм	2...10
толщина корпуса вкладыша, мм	5...20

- минимальная площадь выявляемого дефекта, мм² 2
- время установки рабочего режима не более, мин 5
- время непрерывной работы с последующим 30-минутным перерывом, ч 8
- время диагностирования, мин (L_b – ширина вкладыша, мм) $T = L_b / 17,4$

Одним из преимуществ всех систем, производимых научно-производственным центром "Динамика", является простота использования. Для работы с системой не требуется специальных знаний в области ультразвуковой диагностики. Весь процесс диагностирования выполняется в автоматическом режиме, за исключением подготовительных и заключительных операций, к которым относятся:

- установка вкладыша в баке;
- установка датчика;
- задание параметров вкладыша;
- пуск процесса диагностирования (нажатием программной кнопки);
- сохранение и печать протокола.

Главное окно программного обеспечения (рис. 3, см. с. 2 обложки) содержит:

- 1 – меню программы;
- 2 – панель инструментов;
- 3 – кнопка переключения дефектограмм;
- 4 – текущая дефектограмма;
- 5 – строка результата диагностирования;
- 6 – текстовый протокол диагностирования;
- 7 – кнопка запуска/остановки диагностирования;
- 8 – строка прогресса диагностирования.

В процессе диагностирования на экране формируется цветная дефектограмма вкладыша и текстовый



протокол, описывающий выявленные дефекты. Цвета дефектограммы соответствуют классу дефекта:

- дефект в теле основания – красный;
- дефект в теле заливки – желтый;
- дефект на разделе сред – вишневый;
- поверхностный дефект основания – синий;
- поверхностный дефект заливки – черный;
- сквозное отверстие – коричневый;
- нераспознанный дефект – сине-зеленый;
- область не может быть продиагностирована (акустическая тень) – белый;
- неоднородность в заливке – светло-зеленый;
- норма – зеленый;
- неоднородность в основании – темно-зеленый.

Кнопкой переключения дефектограмм 3, при необходимости, можно "послойно" переключать дефектограммы:

- "Общая дефектограмма" – дефектограмма отображает все обнаруженные дефекты;
- "Дефектограмма заливки" – дефектограмма отображает дефекты заливки, в том числе поверхностные дефекты заливки и отверстия;
- "Дефектограмма раздела сред" – дефектограмма отображает дефекты на разделе сред, отверстия и акустическую тень;
- "Дефектограмма основания" – дефектограмма отображает дефекты основания, в том числе поверхностные дефекты основания, отверстия и акустическую тень.

При диагностировании технологические особенности конструкции вкладыша (проточки, приливки, отверстия и т.п.) будут причислены к поверхностным дефектам. Для учета технологических особенностей вкладыша по окончании диагностирования необходимо отметить их на дефектограмме с помощью "мыши", подведя курсор к соответствующей области и выбрав в контекстном меню пункт "Отметить как тех. особенность". При этом отмеченные области не будут учитываться при подсчете суммарной площади дефектов.

Стоит отметить, что в системе предусмотрено окно "Осциллограф" (рис. 4, см. с. 2 обложки), предназначенное для квалифицированных диагностов. На этом окне отображается текущий сигнал в виде А-SCAN (1) и В-SCAN (7).

Данный экран позволяет визуализировать алгоритм диагностирования, который представляет собой многоступенчатую обработку сигнала:

1) прохождение полученной А-SCAN (огibaющей) сигнала (2) через алгоритм сглаживания (1). Сглаживание позволяет отфильтровывать помехи и в дальнейшем более точно выделять отраженные импульсы;

2) поиск отраженного импульса от внутренней стенки вкладыша (4) в рассчитанной временной области (3);

3) фильтрация возможных переотражений импульса;

4) поиск отраженного импульса от раздела сред (9) в рассчитанной временной области (5),

5) фильтрация возможных переотражений импульса;

6) поиск донного импульса (8) в рассчитанной временной области (6);

7) фильтрация возможных переотражений импульса;

8) выделение оставшихся импульсов, определение их расположения и амплитуд относительно уже найденных импульсов. На этом этапе формируется окончательный массив импульсов;

9) расчет математической модели сигнала исходя из заданной геометрии, параметров материалов вкладыша и времен приходов импульсов;

10) сравнение амплитуд всех выделенных импульсов с расчетной математической моделью и определение дефектов.

Данный алгоритм позволяет не только выявлять дефект, но и, в отличие от большинства дефектоскопов, классифицировать их, что позволяет принимать решения о дальнейшей судьбе дефектного вкладыша: частичный ремонт, перезаливка, утилизация.

По окончании диагностирования формируется окончательный протокол, который может быть распечатан на цветном принтере. Опционально к основному протоколу может быть распечатано приложение – дефектограмма вкладыша. Пример протокола приведен на рис. 5 (см. с. 3 обложки); пример приложения – на рис. 6 (см. с. 3 обложки).

На сегодняшний день стендовая система КОМПАКС®-УЗД, как показывают результаты внедрения, является необходимым инструментом контроля состояния подшипников скольжения. Применение данной системы позволяет существенно повысить качество ремонта агрегатов, сократить сроки ремонта и, соответственно, значительно сократить расходы на эксплуатацию оборудования.

Библиографический список

1. Костюков В.Н. Системы комплексного мониторинга состояния оборудования в реальном времени // В мире неразрушающего контроля. 2008. № 4. С. 42–50.
2. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение. 2002. 224 с.
3. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР КОМПАКС®). М.: Машиностроение, 1999. 163 с.



УДК 621.717

М.Н. Сорокин, д-р техн. наук, **Ю.Н. Ануров**, инженер (Московский государственный вечерний металлургический институт)
E-mail: ayn2001@mail.ru

Определение вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий типа "вал–втулка" при выборе селективных интервалов

Разработана методика определения вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий типа "вал–втулка" по действительным значениям сопрягаемых параметров. Представлена зависимость вероятности бракованных сопряжений от величины допуска на параметр сопряжения. Получено условие бездефектной технологии селективной технологии типа "вал–втулка".

The technique of definition of probability of reception rejected interfaces is developed at selective assemblage of products of type "shaft–plug" on the valid values from parameters. Dependence of probability of the rejected interfaces on admission size on interface parameter is presented. The condition of faultless technology of selective technology of type "shaft–plug" is received.

Ключевые слова: селективная сборка, селективный интервал, задача комплектования, сопрягаемый параметр, параметр сопряжения, метод межгрупповой взаимозаменяемости, полная собираемость изделий, бездефектная технология, бракованные сопряжения, вероятность получения бракованных сопряжений, действительное значение сопрягаемого параметра, истинное значение сопрягаемого параметра, погрешность измерения сопрягаемого параметра.

Keywords: selective assembly, selective interval, acquisition problem, interfaced parameter, interface parameter, method of intergroup interchangeability, full collecting of products, faultless technology, rejected interfaces, probability of reception of the rejected interfaces, valid value of the interfaced parameter, true value of the interfaced parameter, error of measurement of the interfaced parameter.

Реализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при селективной сборке изделий связана либо с выбором селективных интервалов, либо с комплектованием деталей по действительным значениям сопрягаемых параметров.

В работе [3] показано, что при реализации селективной сборки по действительным значениям сопря-

гаемых параметров собираемость изделий всегда выше, чем собираемость изделий при выборе селективных интервалов.

В работе [2] представлена методика определения вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий по действительным значениям сопрягаемых параметров и получены количественные результаты для модельного примера.

В данной работе будет показано, что при реализации селективной сборки изделий на основе выбора селективных интервалов при прочих равных условиях вероятность получения бракованных сопряжений будет всегда выше, чем при реализации селективной сборки по действительным значениям сопрягаемых параметров.

Поэтому селективная сборка, в ходе которой комплектование деталей осуществляют по действительным значениям сопрягаемых параметров, является наиболее эффективным средством получения высокоточных сопряжений.

Реализация селективной сборки на основе выбора селективных интервалов может быть оправдана только тогда, когда требуется обеспечивать взаимозаменяемость какой-либо детали в пределах допустимых селективных групп. Чаще всего селективную сборку применяют при производстве изделий, не подлежащих ремонту.

Введем необходимые обозначения и определения, а также получим некоторые результаты, которые будут нам необходимы для определения вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке при выборе селективных интервалов.

Пусть:

x_i – сопрягаемый параметр втулки и вала, $i = 1, 2$.
В дальнейшем индекс i будет принимать только эти два значения;

δx_i – поле допуска сопрягаемого параметра x_i , $\delta x_i = [-1, +1]$;

Δx_i – допуск на сопрягаемый параметр x_i , $\Delta x_i = 2$;

ξ_i – случайная величина, принимающая действительные значения сопрягаемого параметра x_i , которая определена на отрезке $[-1, +1]$ и имеет функцию рас-

пределения плотности вероятностей $f_i(x_i)$. Символ x_i обозначает как сам сопрягаемый параметр, так и его действительное значение;

ϑ_i – случайная величина, принимающая истинные значения y_i сопрягаемого параметра x_i , которая определена на отрезке $[-a, +a]$, $0 \leq a \leq 1$ и имеет функцию распределения плотности вероятностей $\varphi_i(y_i)$;

ε_i – случайная величина, принимающая значения погрешности измерений z_i сопрягаемого параметра x_i , которая определена на отрезке $[-c, +c]$, $0 \leq c \leq 1$, $a + c = 1$ и имеет функцию распределения плотности вероятностей $e_i(z_i)$ (рис. 1).

Считаем, что $\xi_i = \vartheta_i + \varepsilon_i$ и случайные величины ϑ_i и ε_i являются независимыми. В этом случае совместная функция распределения плотности вероятностей $v_i = v_i(y_i, z_i)$ двумерной случайной величины $\lambda_i = \lambda_i(\vartheta_i, \varepsilon_i)$ будет равна

$$v_i(y_i, z_i) = \varphi_i(y_i) e_i(z_i).$$

Областью ее определения будет прямоугольник $ABCD$ (см. рис. 1).

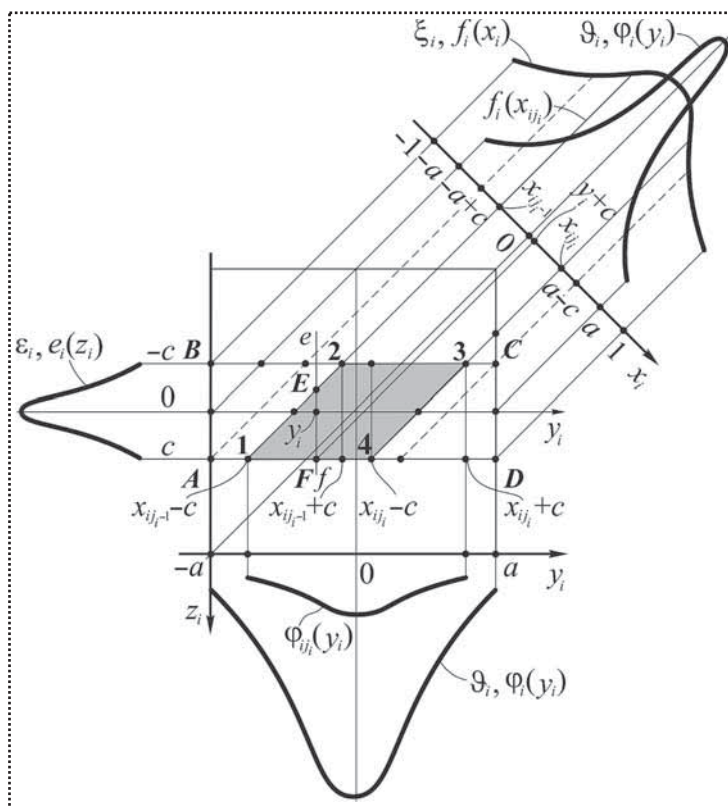


Рис. 1. Определение истинных значений сопрягаемого параметра при условии, что действительные значения принадлежат селективному интервалу

Пусть параметр сопряжения $R = x_1 - x_2$ и величина ΔR определяет допуск на параметр сопряжения R , который должен удовлетворить условию

$$-\frac{\Delta R}{2} \leq R \leq \frac{\Delta R}{2}.$$

Считаем, что случайные величины ϑ_i и ε_i известны. Тогда известна функция распределения $v_i = v_i(y_i, z_i)$ и мы можем определить функцию распределения $f_i(x_i)$ случайной величины ξ_i .

На отрезке $[-1, +1]$ оси x_i выделим точки $x_i = -a + c$ и $x_i = a - c$. Тогда отрезок $[-1, +1]$, т.е. область определения функции распределения $f_i(x_i)$ случайной величины ξ_i , разобьется на три отрезка $[-1, -a + c]$, $[-a + c, a - c]$ и $[a - c, +1]$, для каждого из которых можем найти значение функции $f_i(x_i)$ через интеграл свертки [2].

Значение функции распределения $f_i(x_i)$ для этих отрезков определяется следующим образом:

$$f_i(x_i) = \begin{cases} \int_{-a}^{x_i+c} \varphi_i(y_i) e_i(x_i - y_i) dy_i, & x_i \in [-1; -a + c], \\ \int_{x_i-c}^{x_i+c} \varphi_i(y_i) e_i(x_i - y_i) dy_i, & x_i \in [-a + c, a - c], \\ \int_{x_i-c}^a \varphi_i(y_i) e_i(x_i - y_i) dy_i, & x_i \in [a - c, +1]. \end{cases} \quad (1)$$

Разобьем поле допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i , т.е. отрезок $[-1, +1]$, на n селективных интервалов, равных по длине.

Пусть:

δ – длина селективного интервала, $\delta = \frac{2}{n}$;

$x_{i j_i}$ – действительное значение сопрягаемого параметра x_i в точках деления поля допуска δx_i на селективные интервалы δ , $j_i = \overline{0, n}$, $\delta = x_{i j_i} - x_{i j_i - 1}$;

$p_{i j_i}$ – относительное число i -х деталей в j -й селективной группе:

$$p_{i j_i} = \int_{x_{i j_i - 1}}^{x_{i j_i}} f_i(x_i) dx_i.$$

Для определения вероятности получения бракованных сопряжений необходимо знать решение задачи комплектования.

Считаем, что это решение известно.

Пусть:

S – множество допустимых путей комплектования, определяющее решение задачи комплектования;



$s(j_1, j_2)$ – допустимый путь комплектования, определяющий решение задачи комплектования, $s(j_1, j_2) \in S$;

$p(j_1, j_2)$ – относительное число сборочных комплектов, полученных на допустимом пути комплектования $s(j_1, j_2)$;

$p_{\text{соб}}$ – общая собираемость изделий:

$$p_{\text{соб}} = \sum_{s(j_1, j_2) \in S} p(j_1, j_2);$$

$k_{\text{уст}}$ – коэффициент запаса устойчивости решения задачи комплектования.

Определим функцию распределения истинных значений $\varphi_{i j_i}(y_i)$ сопрягаемого параметра x_i , если известны его действительные значения на произвольном селективном интервале $\delta = x_{i j_i} - x_{i j_i-1}$.

Значения функции распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$ и область ее определения $Y_{i j_i}$ зависят от места расположения точек $x_{i j_i-1}$ и $x_{i j_i}$ на отрезке $[-1, +1]$ оси x_i и, следовательно, от множества, ограниченного отрезками 1–2, 2–3, 3–4, 4–1 (см. рис. 1).

Рассмотрим построение функции распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$ на конкретном примере. Пусть селективный интервал $[x_{i j_i-1}, x_{i j_i}]$ для сопрягаемого параметра x_i выбран так, как это показано на рис. 1.

На оси y_i выделим точки $x_{i j_i-1} - c$, $x_{i j_i-1} + c$, $x_{i j_i} + c$. Тогда областью определения $Y_{i j_i}$ функции распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$ будет отрезок $[x_{i j_i-1} - c, x_{i j_i} + c]$. Данный отрезок можно разбить на три отрезка: $[x_{i j_i-1} - c, x_{i j_i-1} + c]$, $[x_{i j_i-1} + c, x_{i j_i} - c]$, $[x_{i j_i} - c, x_{i j_i} + c]$.

Тогда для каждого отрезка области определения $Y_{i j_i}$ определяем функцию распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$:

$$\varphi_{i j_i}(y_i) = \begin{cases} \varphi_i(y_i) \int_{x_{i j_i-1}}^{y_i+c} e_i(x_i - y_i) dx_i, & y_i \in [x_{i j_i-1} - c, x_{i j_i-1} + c], \\ \varphi_i(y_i) \int_{y_i-c}^{y_i+c} e_i(x_i - y_i) dx_i, & y_i \in [x_{i j_i-1} + c, x_{i j_i} - c], \\ \varphi_i(y_i) \int_{y_i-c}^{x_{i j_i}} e_i(x_i - y_i) dx_i, & y_i \in [x_{i j_i} - c, x_{i j_i} + c]. \end{cases} \quad (2)$$

Из соотношений (2) видно, что функции распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$ для каждого отрезка области определения $Y_{i j_i}$ (отрезок $[x_{i j_i-1} - c, x_{i j_i} + c]$), имеют один и тот же вид и отличаются только пределами интегрирования. Определяем значение функции распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$ в точке y_i , $y_i \in [x_{i j_i-1} - c, x_{i j_i-1} + c]$. Про-

водим через точку y_i прямую ef , параллельную оси z_i и пересекающую границы параллелограмма 1, 2, 3, 4 в точках E и F . В любых точках прямоугольника $ABCD$ всегда выполняется соотношение $x_i = y_i + z_i$. В точке E мы имеем $x_i = x_{i j_i-1}$, а в точке F имеем $x_i = y_i + c$. Значения $x_{i j_i-1}$ и $y_i + c$ определяют нижний и верхний пределы интегрирования при вычислении значения функции распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$ в точке y_i , $y_i \in [x_{i j_i-1} - c, x_{i j_i-1} + c]$.

Подобным образом мы можем определить функцию распределения $\varphi_{i j_i}(y_i)$ для произвольного селективного интервала δ сопрягаемого параметра x_i .

Очевидно, что

$$p_{i j_i} = \int_{Y_{i j_i}} \varphi_{i j_i}(y_i) dy_i.$$

Теперь определим вероятность получения бракованных сопряжений $p_{\text{бр}}$, зная решение задачи комплектования.

Определим вероятность получения бракованных сопряжений $p_{\text{бр}}(j_1, j_2)$ на допустимом пути комплектования $s(j_1, j_2)$, являющимся решением задачи комплектования.

Алгоритм решения задачи комплектования [1] предусматривает получение на допустимом пути комплектования $s(j_1, j_2)$ максимального числа сборочных комплектов, т.е.

$$p(j_1, j_2) = \min(p_{1j_1}, p_{2j_2}).$$

Для простоты изложения будем считать, что для допустимого пути комплектования $s(j_1, j_2)$ в процессе реализации алгоритма комплектования из селективных групп с номерами j_1 и j_2 детали еще не выбирались и в них содержится относительное число деталей p_{1j_1} и p_{2j_2} .

Пусть $p(j_1, j_2) = p_{1j_1}$. Для j_1 -го и j_2 -го селективных интервалов определим функции распределения истинных значений $\varphi_{1j_1}(y_1)$ и $\varphi_{2j_2}(y_2)$ сопрягаемых параметров x_1 и x_2 .

Тогда функция распределения $\Phi(R)$, равная интегралу сверки

$$\begin{aligned} \Phi(R) &= \frac{1}{p_{1j_1}} \varphi_{1j_1}(y_1) \frac{1}{p_{1j_1} p_{2j_2}} \varphi_{2j_2}(y_2) p(j_1, j_2) = \\ &= \varphi_{1j_1}(y_1) \varphi_{2j_2}(y_2) \frac{1}{p_{2j_2}}, \end{aligned}$$

определил функцию распределения истинных значений параметра сопряжения R при сборке деталей на допустимом пути комплектования $s(j_1, j_2)$.



Коэффициент $\frac{p_{1j_1}}{p_{2j_2}}$ нужен для того, чтобы показать, что из селективных групп с номерами j_1 и j_2 выбирают одинаковое относительное число деталей, т.е. p_{1j_1} .

Коэффициент $\frac{1}{p_{1j_1}}$ нужен для того, чтобы функции $\varphi_{1j_1}(y_1)$ и $\frac{p_{1j_1}}{p_{2j_2}} \varphi_{2j_2}(y_2)$ были нормированными функциями распределения.

Множитель $p(j_1, j_2) = p_{1j_1}$ нужен для того, чтобы функция распределения $\Phi(R)$ соответствовала относительному числу сборочных комплектов $p(j_1, j_2)$.

Вероятность получения бракованных сопряжений $p_{бр}(j_1, j_2)$ на допустимом пути комплектования $s(j_1, j_2)$ определим как

$$p_{бр}(j_1, j_2) = p(j_1, j_2) - \int_{-\frac{\Delta R}{2}}^{+\frac{\Delta R}{2}} \Phi(R) dR.$$

Общая вероятность получения бракованных сопряжений $p_{бр}$ при селективной сборке при выборе селективных интервалов

$$p_{бр} = \sum_{s(j_1, j_2) \in S} p_{бр}(j_1, j_2).$$

Данная математическая модель определения вероятности получения бракованных сопряжений построена в предположении, что случайная величина $\lambda_i = \lambda_i(\vartheta_i, \varepsilon_i)$ известна и, следовательно, известны случайные величины ξ_i, ϑ_i и ε_i . При этом $\xi_i = \vartheta_i + \varepsilon_i$.

В действительности нам известны только случайные величины ξ_i и ε_i . Физическая и математическая связи между случайными величинами ξ_i, ϑ_i и ε_i неизвестны. Поэтому определить случайную величину $\lambda_i = \lambda_i(\vartheta_i, \varepsilon_i)$ невозможно. Следовательно, построить математическую модель определения вероятности брака для реальных значений случайных величин ξ_i и ε_i не представляется возможным. Однако построенная математическая модель определения вероятности получения бракованных сопряжений позволяет дать качественную оценку вероятности брака в зависимости от ряда факторов.

Авторами были проведены расчеты с целью определения вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий типа "вал-втулка" при выборе селективных интервалов для сопрягаемых параметров.

В качестве исходных данных для модельного примера были приняты следующие.

Случайная величина ϑ_1 получена из случайной величины $\bar{\vartheta}_1 = N(0, \sigma_1^2)$, $6\sigma_1 = 1,8$ путем выбора части ее распределения на отрезке $[-0,9; +0,9]$ и ее нормирования.

Случайная величина ϑ_2 получена из случайной величины $\bar{\vartheta}_2 = N(0, \sigma_2^2)$, $3\sigma_2 = 1,8$ путем выбора части ее распределения на отрезке $[-0,9; +0,9]$ и ее нормирования.

Случайная величина ε_i выбрана как $\varepsilon_i = N(0, \sigma_\varepsilon^2)$ на отрезке $[-0,1; +0,1]$, $6\sigma_\varepsilon = 0,2$. Случайная величина ξ_i получена из соотношений (1).

Селективные интервалы были выбраны $\delta = 0,01$, $\delta = 0,2$.

Случаю $\delta = 0,01$ соответствует селективная сборка по действительным значениям сопрягаемых параметров.

Для количественной оценки вероятности получения брака была проведена дискретизация данной за-

Зависимость $k_{уст}$, $p_{соб}$ и $p_{бр}$ от величины допуска ΔR на параметр сопряжения R и длины селективного интервала δ

δ	Параметр	ΔR										
		0,02	0,10	0,20	0,40	0,50	0,60	0,80	0,90	1,20	1,60	2,00
0,01	$k_{уст}$	0,776	0,823	0,880	0,978	1,000	1,016	1,034	1,047	1,112	1,270	1,500
	$p_{соб}$	0,776	0,823	0,880	0,978	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
	$p_{бр}$	0,776	0,412	0,275	0,132	0,086	0,040	0,015	0,000	0,000	0,000	0,000
0,20	$k_{уст}$	—	—	—	0,776	—	—	0,995	—	1,080	1,238	1,500
	$p_{соб}$	—	—	—	0,776	—	—	0,995	—	1,000	1,000	1,000
	$p_{бр}$	—	—	—	0,201	—	—	0,032	—	0,015	0,000	0,000

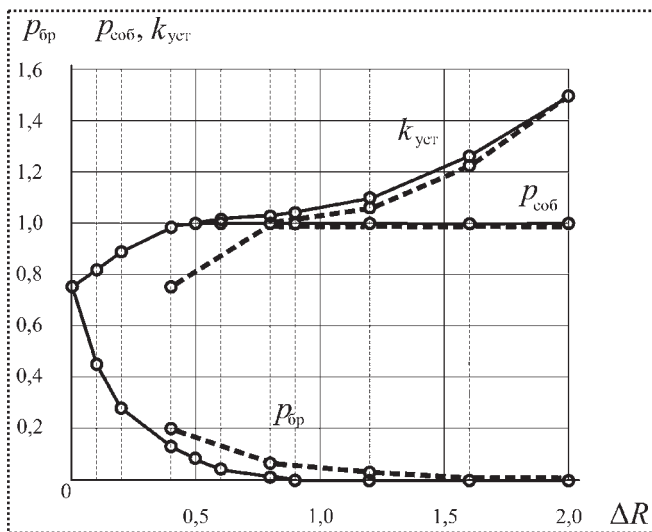


Рис. 2. Зависимости изменения $k_{\text{уст}}$, $P_{\text{собр}}$ и $P_{\text{брак}}$ от величины допуска ΔR на параметр сопряжения R и длины селективного интервала δ :

— $\delta = 0,01$; — $\delta = 0,2$

дачи. Отрезок дискредитации был выбран равным 0,01.

Данные модельного эксперимента приведены в таблице и представлены в виде графиков (рис. 2).

Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением допуска ΔR на параметр сопряжения R вероятность получения бракованных сопряжений $P_{\text{брак}}$ уменьшается.

При $\delta = 0,2$ и $\Delta R = 0,4$ вероятность получения бракованных сопряжений $P_{\text{брак}}$ достигает своего максимального значения. При $\delta = 0,2$ и $\Delta R = 1,2$ собираемость изделий $P_{\text{собр}} = 1,000$; $k_{\text{уст}} = 1,080$. Для $\delta = 0,2$ и $\Delta R = 0,8$ собираемость изделий $P_{\text{собр}} = 0,995$.

Минимальное значение допуска ΔR на параметр сопряжения R , при котором обеспечивается полная собираемость, назовем критическим значением допуска на параметр сопряжения и обозначим $\Delta R_{\text{кр}}$.

Тогда при выборе $\Delta R \geq \Delta R_{\text{кр}} + 4c$ мы уже не получим бракованных изделий. Данное условие определя-

ет бездефектную технологию селективной сборки изделий типа "вал—втулка".

Выводы

1. Представлена методика определения вероятности получения бракованных сопряжений в ходе селективной сборки изделий типа "вал—втулка" при выборе селективных интервалов для сопрягаемых параметров.

2. Для модельного примера получены количественные значения вероятности брака в зависимости от величины допуска на параметр сопряжения при фиксированном выборе длины селективного интервала и фиксированных законах распределения истинных значений сопрягаемых параметров и ошибок измерения.

3. Показано, что при прочих равных условиях (допуске на параметр сопряжения, законах распределения) реализация селективной сборки по действительным значениям сопрягаемых параметров обеспечивает меньшую вероятность брака, чем при реализации селективной сборки при выборе селективных интервалов.

4. Реализация селективной сборки по действительным значениям сопрягаемых параметров обеспечивает как максимальную собираемость изделий, так и минимальное значение вероятности получения бракованных сопряжений. И поэтому является самым перспективным способом получения высокоточных сопряжений.

Библиографический список

1. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Алгоритм решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" по методу межгрупповой взаимозаменяемости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 9. С. 15–18.
2. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Определение вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" по действительным значениям сопрягаемых параметров // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5. С. 31–35.
3. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Анализ собираемости изделий типа "вал—втулка" при селективной сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 1. С. 23–26.

УДК 621.9.06(075.8)

А.А. Фомин, канд. техн. наук (Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)
E-mail: fomin1@mail.ru

Влияние дополнительной опоры заготовки в зоне резания на устойчивость процесса обработки

Рассмотрены альтернативные варианты дополнительной опоры в зоне резания при механической обработке анизотропных деталей. Выбрана схема, которая обеспечивает стабильную обработку деталей.

Alternative variants of an additional support in a cutting zone during mechanical processing of anisotropic details are considered. The scheme which provides stable processing of details is selected.

Ключевые слова: фрезерование, деталь, устойчивость, дополнительная опора, упругая деформация, технологическая система, режущий инструмент, анизотропные свойства.

Keywords: milling, detail, stability, an additional support, elastic deformation, the technological system, the cutting tool, anisotropic properties.

В машиностроительной и деревообрабатывающей промышленности довольно часто требуется обрабатывать заготовки с непредсказуемыми криволинейными поверхностями и анизотропными свойствами. Примером таких заготовок могут служить рамы, надрессорные балки железнодорожных грузовых вагонов, отходы древесины в виде горбыля, образующегося после распила бревен, и др.

Горбыль характеризуется не только стохастическим изменением профиля продольного и поперечного сечения, отсутствием развитых технологических баз, но и переменной толщиной снимаемого припуска и твердостью обрабатываемого материала, обусловленной более высокой плотностью сучков, расположенных в теле стволовой древесины. Физико-механические свойства горбыля анизотропные, они различаются в продольном и поперечном сечениях заготовки и в местах расположения сучков. До настоящего времени горбыль использовали для производства топливных гранул и других изделий непрямого назначения, в то время как он представляет собой наиболее качественную периферийную часть бревна, которую целесообразно использовать для производства продукции.

Для механической обработки горбыля разработан станок с программным управлением и системой автоматического управления рабочей подачей заготовки [1], на котором можно фрезеровать фасонную поверхность, обрезать боковые криволинейные кромки и получать качественную древесную продукцию для строительства современных домов и других объектов. В процессе фасонного фрезерования горбыля необходимо соблюдать режим, при котором исключается нестабильная обработка, характеризующаяся высоким уровнем вибрации в технологической системе.

Для обеспечения таких условий были рассмотрены три схемы установки в зоне резания дополнительных опор, ограничивающих упругие деформации заготовки при обработке:

1) заготовка опирается на несколько фрикционных роликов или валцов, между которыми напротив фрезы не установлено какой-либо дополнительной опоры (рис. 1);

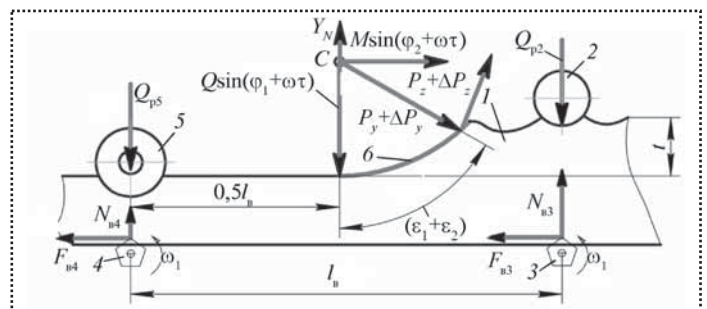


Рис. 1. Схема обработки заготовки без дополнительной опоры: 1 – заготовка; 2 – заостренный ролик; 3, 4 – приводные валцы; 5 – фасонный прижимной ролик; 6 – след реза зубом фрезы; Q и M – центробежная сила и инерционный изгибающий момент, обусловленные дисбалансами фрезы; ϕ_1 и ϕ_2 – углы силы Q и момента M соответственно; ω – угловая скорость фрезы; τ – текущее время обработки; Q_{p2} и Q_{p5} – силы прижатия заготовки роликами 2 и 5; $P_y + \Delta P_y$ – радиальная составляющая силы резания; $P_z + \Delta P_z$ – главная составляющая силы резания; N_{n3} и N_{n4} – нормальные реакции валцов 3 и 4; F_{b3} и F_{b4} – тяговые усилия, создаваемые валцами 3 и 4; ω_1 – угловая скорость валцов 3 и 4; l_n – межосевое расстояние валцов; $(\epsilon_1 + \epsilon_2)$ – угол контакта фрезы с заготовкой; t – глубина резания

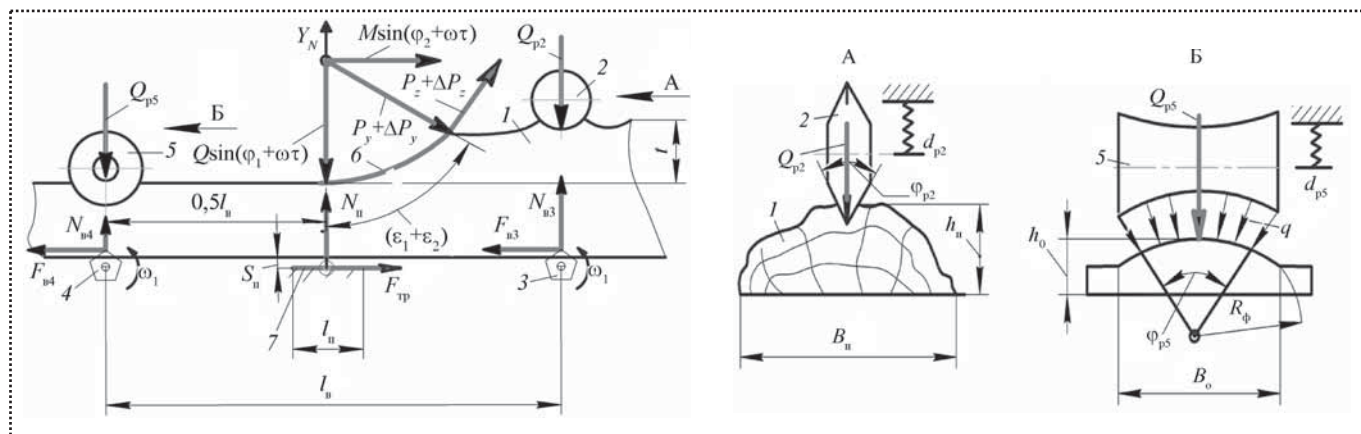


Рис. 2. Горбыль под действием рабочей нагрузки при установке дополнительной опорной пластины:

7 – опорная пластина; l_n и S_n – длина пластины и исходный зазор между пластиной и заготовкой; $F_{тр}$ и N_n – сила трения и нормальная реакция пластины; d_{p2} и d_{p5} – жесткость пружины роликов 2 и 5; φ_{p2} – угол заострения ролика 2; B_n и h_n , B_o и h_o – ширина и высота необработанной и обработанной частей заготовки соответственно; φ_{p5} – угол контакта ролика 5 с обработанной поверхностью; q – равномерно распределенная нагрузка на заготовку; R_ϕ – радиус фрезы

2) в сечении максимального прогиба заготовки установлена металлическая пластина 7, образующая зазор S_n с базовой плоскостью горбыля (рис. 2);

3) между соседними приводными вальцами, напротив фрезы, установлен дополнительный фрикционный ролик 8, постоянно находящийся в контакте с базовой плоскостью заготовки (рис. 3).

Во избежание путаницы на рисунках 1–3 дана единая нумерация позиций.

Рассмотрим обработку заготовки по *первой схеме*.

В процессе фрезерования неокоренной криволинейной поверхности заготовки (горбыля) 1 снимается припуск глубиной t . Фасонная фреза вращается с угловой скоростью ω и действует на заготовку составляющими силы резания $(P_y + \Delta P_y)$ и $(P_z + \Delta P_z)$. Каждая из составляющих включает в себя соответственно постоянный член P_y , P_z и переменный член ΔP_y , ΔP_z . Переменный член возникает в результате обработки

материала с нестабильными и анизотропными свойствами (наличие сучков, различные свойства древесины в продольном и поперечном направлениях и др.). После единичного реза зуб инструмента оставляет след на заготовке в виде кривой 6. Первая, радиальная составляющая $(P_y + \Delta P_y)$ направлена под углом $(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$ к отрицательной полуоси Y_N , а главная составляющая $(P_z + \Delta P_z)$ перпендикулярна первой.

На заготовку действуют также вектор неуравновешенной центробежной силы $Q \sin(\varphi_1 + \omega\tau)$, обусловленный главным вектором дисбалансов $D_{ст}$, и изгибающий момент $M \sin(\varphi_2 + \omega\tau)$, вызванный главным моментом дисбалансов M_D инструмента (τ – текущее время обработки). Сила Q и момент M изменяются по синусоидальному закону с начальной угловой координатой φ_1 и φ_2 соответственно. Максимальная нагрузка на шпиндельный узел с инструментом возникает, когда главный вектор $D_{ст}$ перпендикулярен главному моменту дисбалансов M_D , что отражено на расчетной схеме. Заготовка 1 движется со скоростью рабочей подачи при вращении вальцов 3 и 4 с угловой скоростью ω_1 и прижимается роликами 2 и 5 к вальцам с усилиями Q_{p2} и Q_{p5} , под действием которых зубья вальцов врезаются в базовую поверхность горбыля, что обеспечивает передачу заготовке тяговых усилий $F_{в3}$ и $F_{в4}$.

Со стороны опорных вальцов 3 и 4 возникают нормальные реакции $N_{в3}$ и $N_{в4}$. Фасонный прижимной ролик 5 прижимается к обработанной поверхности горбыля с усилием, обеспечивающим направление левого конца заготовки и не допускающим повреждения фрезерованной поверхности. Под действием силы Q , момента M и составляющих силы

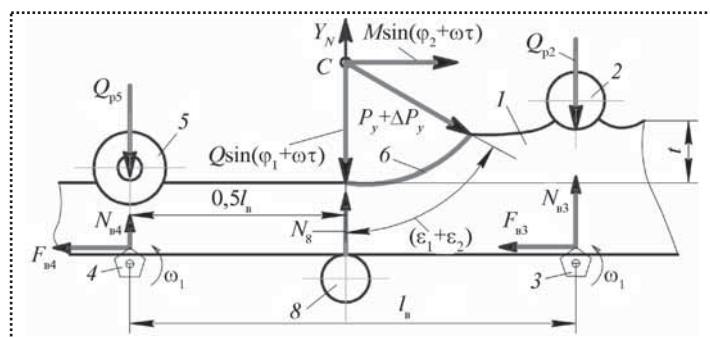


Рис. 3. Схема установки в зоне резания фрикционного ролика: 8 – опорный фрикционный ролик



резания заготовка изгибается, а ее максимальная деформация в направлении оси Y_N

$$y_{\max} = \frac{l_b^3 [Q \sin(\varphi_1 + \omega\tau) + (P_y + \Delta P_y) \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (P_z + \Delta P_z) \sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)]}{48 E I}, \quad (1)$$

где l_b – межосевое расстояние валцов 3 и 4;

φ_1 – угол главного вектора дисбалансов;

ω – угловая скорость фрезы;

τ – время фрезерования;

ε_1 и ε_2 – соответственно углы контакта фрезы со ствольной древесиной и корой, которой покрыт горбыль;

E – модуль упругости ствольной древесины горбыля, $E = 13,1$ ГПа;

I – момент инерции поперечного сечения заготовки.

Участок горбыля длиной $0,5 l_b$, расположенный слева от фрезы, прошел стадию обработки, а правая половина заготовки не обработана, поэтому момент инерции поперечного сечения следует искать на основании приведенных размеров заготовки.

Точка выхода зуба фрезы из контакта с заготовкой отстоит от осевой плоскости симметрии фрезы на расстоянии

$$l_k = \sqrt{D_\phi t - t^2}, \quad (2)$$

где D_ϕ – диаметр фрезы;

t – глубина резания.

Отрезок l_k не превышает 10 мм, а по сравнению с длиной l_b является малой величиной, вследствие чего им можно пренебречь. В результате получаем заготовку, половина которой не обработана. Для такой заготовки момент инерции поперечного сечения относительно оси Y_N

$$I = \frac{(h_n + h_o)^3 (B_n + B_o)}{192}, \quad (3)$$

где h_n и B_n – высота и ширина поперечного сечения необработанной половины заготовки;

h_o и B_o – высота и ширина поперечного сечения обработанной половины заготовки.

Внутренние напряжения в материале заготовки, появившиеся вследствие упругих деформаций, вызывают силу упругости $y_{\max} d_r$ (d_r – жесткость горбыля в направлении оси Y_N). После окончания единичного реза контакт фрезы с заготовкой прекращается, поэтому $P_y + \Delta P_y = P_z + \Delta P_z = 0$. При этом исчезает материальная среда, посредством которой передается действие неуравновешенной центробежной силы $Q = D_{cr} \omega^2$ и изгибающего момента $M = M_D \omega^2$ на обрабатываемую заготовку.

Заготовка на короткий отрезок времени представлена сама себе, при этом в момент прекращения резания она напряжена, т.е. в теле горбыля действует упругая восстанавливающая сила $y_{\max} d_r$. Заготовка стремится к своему равновесному состоянию, однако этому препятствуют очередные резы, наносимые инструментом при обработке. Чем больше время релаксации, тем в большей степени заготовка успевает восстановить свое исходное пространственное положение.

Величина y_{\max} зависит от значений силы резания, силы Q , изгибающего момента M , размеров обрабатываемой заготовки и других факторов и может достигать значительных величин, так как ограничений для упругих деформаций заготовки при первой схеме нет.

При значительных перепадах упругих деформаций (от $+y_{\max}$ до $-y_{\max}$) силы трения в местах контакта заготовки с валцами 3, 4 и роликами 2, 5 изменяются в сравнительно широких пределах. Ситуация усугубляется тем, что заготовка в процессе упругого восстановления движется навстречу режущему зубу фрезы, в результате чего очередной контакт инструмента с заготовкой происходит более жестко.

Следующее негативное явление, характерное для обработки заготовки без дополнительной опоры (см. рис. 1), заключается в опасности появления резонанса, обусловленного совпадением или близким расположением собственной частоты поперечных колебаний горбыля к частоте внешнего динамического воздействия. Частота собственных (свободных) колебаний заготовки

$$f_c = \sqrt{d_r / M_r}, \quad (4)$$

где d_r – жесткость горбыля в направлении оси Y_N ;

M_r – масса заготовки, расположенной между смежными валцами и участвующей в колебательном процессе.

Частота внешнего динамического воздействия

$$f_b = \frac{nZ}{60}, \quad (5)$$

где n – частота вращения фрезы;

Z – число зубьев фрезы.

Стабильное протекание процесса обработки горбыля достигается при условии

$$f_p = (0,6 \dots 0,7) f_{kp1}, \quad (6)$$

где f_p – рабочая частота, при которой отсутствует резонанс при обработке;

f_{kp1} – первая критическая частота, при которой наступает резонанс, $f_{kp1} = f_c$.



Расчеты по формуле (5) показывают, что для условий механической обработки при скорости резания 45...50 м/с, числе зубьев фрезы $Z = 4-10$ частота вынужденной силы составляет 330...830 Гц. Для стабильного протекания процесса обработки необходимо выполнять проверочные расчеты по формуле

$$f_c = \sqrt{\frac{d_r}{M_r}} \neq f_b = \frac{nZ}{60}. \quad (7)$$

Знак неравенства в выражении (7) поставлен ввиду того, что частота внешнего динамического воздействия высокая и возможны случаи, когда не удастся собственную частоту колебаний заготовки привести в соответствие с выражением (6).

Жесткость заготовки, расположенной между соседними вальцами,

$$d_r = \frac{P}{y_{\max}}, \quad (8)$$

где P – сила, действующая на заготовку в процессе обработки, $P = Q \sin(\varphi_1 + \omega\tau) + (P_y + \Delta P_y) \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (P_z + \Delta P_z) \sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)$.

Подставляя в формулу (8) значение P и y_{\max} , получим:

$$d_r = \frac{48 EI}{l_b^3}. \quad (9)$$

Подставим формулу (3) в выражение (9), а результат этой процедуры – в формулу (7), выполним преобразования и получим формулу для расчета частоты собственных колебаний заготовки:

$$f_c = \frac{h_n + h_o}{l_b} \sqrt{\frac{E(h_n + h_o)(B_n + B_o)}{l_b M_r}}. \quad (10)$$

Как следует из формулы (10), частота собственных колебаний обрабатываемой заготовки зависит от межосевого расстояния l_b , с увеличением которого частота f_c уменьшается. Верхнее предельное значение рабочей частоты колебаний заготовки, при которой нет резонанса,

$$f_p = 0,7 \frac{nZ}{60}. \quad (11)$$

Процесс фрезерования горбыля характеризуется следующими параметрами: частота вращения инструмента $n = 4800 \text{ мин}^{-1}$; число режущих зубьев фрезы $Z = 4-10$; максимальное значение рабочей частоты, при которой обеспечивается стабильный режим (без резонанса и высокого уровня вибрации) – 214...560 Гц.

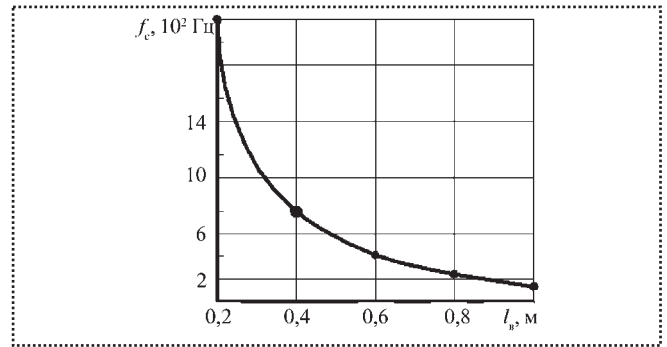


Рис. 4. Влияние межосевого расстояния опорных вальцов на собственную частоту колебаний заготовки

Расчеты по формуле (10) при $h_n = 0,08 \text{ м}$; $h_o = 0,06 \text{ м}$; $B_n = B_o = 0,25 \text{ м}$; $E = 13,1 \text{ ГПа}$; $M_r = 12 \text{ кг}$; $l_b = 0,2...1,0 \text{ м}$ показали, что обработка заготовки может протекать как в дорезонансном, так и зарезонансном режимах.

Частота f_c собственных колебаний заготовки асимптотически уменьшается при увеличении межосевого расстояния l_b (рис. 4). При $l_b = 0,2...0,5 \text{ м}$ частота f_c превышает частоту вынужденной силы, а при $l_b > 0,5 \text{ м}$ возникает резонансный или зарезонансный режим фрезерования. Зарезонансный режим вызывает необходимость перехода через первую критическую частоту $f_{кр1} = f_c$ для вывода шпинделя с фрезой на рабочую скорость. Такая ситуация нежелательна и ее следует избегать.

Во избежание резонанса следует назначать малое расстояние l_b между вальцами 3 и 4 и фрезеровать заготовку со сравнительно большими размерами h_n , B_n , h_o , B_o . Но при малом l_b усложняется устройство подачи заготовки из-за увеличения числа вальцов, а увеличение размеров заготовки сужает технологические возможности первой схемы.

Таким образом, первой схеме свойственны следующие недостатки:

- изменение в сравнительно широких пределах сил трения, что может явиться причиной автоколебаний в технологической системе;
- контакт инструмента с заготовкой происходит в жестких условиях;
- стабильная обработка происходит при малом межосевом расстоянии опорных вальцов и больших размерах заготовки, что существенно сужает технологические возможности первой схемы.

При *второй схеме* (см. рис. 2) ограничение максимального прогиба заготовки y_{\max} до допустимого значения $[y]$ достигается использованием опорной пластины 7 длиной l_n , которая в исходном положении образует зазор S_n с рабочей плоскостью стола. При контакте заготовки с пластиной возникает нормальная



реакция $N_{\text{п}}$. Ролик 2 заострен под углом φ_{p2} (см. рис. 2, вид А), что приводит к врезанию ролика в заготовку

сколькуча появляется нормальная реакция пластины $N_{\text{п}}$. Реакции вальцов в этом случае

$$N_{\text{в3}} = Q_{\text{p2}} + \frac{Q \sin(\varphi_1 + \omega\tau) + (P_y + \Delta P_y) \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (P_z + \Delta P_z) \sin(\varepsilon_2 + \varepsilon_2)}{2} - 0,5(N_{\text{п}} - y_r d_r); \quad (16)$$

$$N_{\text{в4}} = Q_{\text{p5}} + \frac{Q \sin(\varphi_1 + \omega\tau) + (P_y + \Delta P_y) \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (P_z + \Delta P_z) \sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} - 0,5(N_{\text{п}} - y_r d_r). \quad (17)$$

и устранению ее перекосов в процессе обработки. Со стороны обработанной поверхности установлен ролик 5, очерченный по радиусу $R_{\text{ф}}$ фасонной фрезы (рис. 2, вид Б). Усилие прижатия ролика 5 регулируется пружиной. Пружины роликов 2 и 5 имеют жесткость d_{p2} и d_{p5} соответственно.

Центр C фрезы расположен посередине между роликами 2 и 5. Ролик 5 создает равномерно распределенную нагрузку q на обработанную поверхность в пределах центрального угла φ_{p5} на длине угла $R_{\text{ф}}\varphi_{\text{p5}}$, что создает усилие

$$F_{\text{в.п}} = 0,5 q \varphi_{\text{p5}} R_{\text{ф}} \sin(0,25 \varphi_{\text{p5}}), \quad (12)$$

где q – равномерно распределенная нагрузка на обработанную поверхность со стороны фасонного ролика 5;

φ_{p5} – угол контакта ролика 5 с обработанной поверхностью.

Усилие $F_{\text{в.п}}$ фиксирует положение продольной оси горбыля и устраняет поперечное смещение при механической обработке заготовки с сучками.

Когда фактические упругие деформации $y < [y]$, внешняя рабочая нагрузка распределяется между опорными вальцами 3 и 4. При отсутствии процесса резания нормальные реакции $N_{\text{в3}}$ и $N_{\text{в4}}$ вальцов определяются степенью сжатия пружин и жесткостью d_{p2} и d_{p5} . В ходе обработки при $y < [y]$ реакции

$$N_{\text{в3}} = Q_{\text{p2}} + \frac{Q \sin(\varphi_1 + \omega\tau) + (P_y + \Delta P_y) \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (P_z + \Delta P_z) \sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2}; \quad (13)$$

$$N_{\text{в4}} = Q_{\text{p5}} + \frac{Q \sin(\varphi_1 + \omega\tau) + (P_y + \Delta P_y) \cos(\varepsilon_1 + \varepsilon_2) - (P_z + \Delta P_z) \sin(\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{2} \quad (14)$$

где Q_{p2} и Q_{p5} – усилия прижатия заготовки соответственно роликами 2 и 5. Приблизительное суммарное значение силы трения между вальцами, роликами и заготовкой при отсутствии резания

$$F = f_1 (Q_{\text{p2}} + Q_{\text{p5}} + N_{\text{в3}} + N_{\text{в4}}), \quad (15)$$

где f_1 – коэффициент трения между заготовкой, роликами и вальцами.

В процессе фрезерования заготовки, когда $y = [y]$, распределение внешней нагрузки изменяется, по-

силе трения в месте контакта пластины 7 и заготовки

$$F_{\text{тр.п}} = f_2 N_{\text{п}}, \quad (18)$$

где f_2 – коэффициент трения скольжения древесины о металл.

Сила трения $F_{\text{тр.п}}$ достигает своего наибольшего значения тогда, когда фактическая упругая деформация заготовки равна допускаемому значению $[y]$. Численное значение нормальной реакции пластины $N_{\text{п}}$ определяется из выражений (16) или (17). Поскольку часть внешней нагрузки принимает на себя пластина, то нагрузка, которую испытывают вальцы 3 и 4 при второй схеме обработки меньше, чем при первой схеме, следовательно, силы трения в этих элементах также уменьшаются.

Суммарная сила трения при второй схеме обработки складывается из сил трения заготовки с вальцами и пластиной 7:

$$F_{\text{тр2}} = F_{\text{тр.п}} + F_{\text{в3}} + F_{\text{в4}} + F_{\text{p2}} + F_{\text{p5}}. \quad (19)$$

Сила трения $F_{\text{тр2}}$ превосходит по величине силу трения, возникающую при первой схеме обработки. При отсутствии резания сила $F_{\text{тр.п}} = 0$, а при обработке заготовки $F_{\text{тр.п}} > 0$, что вызывает изменение сил трения и способствует возникновению автоколебаний в системе. По степени упругой деформации заготовки

вторая схема по сравнению с первой более предпочтительна, поскольку при этой схеме упругие силы горбыля, восстанавливающие систему, меньше, чем при первой схеме,

$$[y]_2 d_r = S_{\text{п}} d_r < y_{\text{max}} d_r, \quad (20)$$

где $[y]_2$ – упругая деформация заготовки при второй схеме.

Меньшие упругие силы способствуют уменьшению скорости восстановления заготовки, а следова-



тельно, жесткости удара заготовки при встрече с режущими зубьями фрезы. Одновременно с этим периодический контакт заготовки с режущими зубьями фрезы и его прерывание происходят с частотой вынужденной силы резания, что приводит к раскачиванию технологической системы и большой вероятности возникновения автоколебаний. В равенстве (19) составляющие $F_{в3}$, $F_{в4}$, $F_{р2}$ и $F_{р5}$ можно уменьшить путем установки валцов 3, 4 и роликов 2, 5 на подшипники качения. В этом случае в равенстве (19) составляющая $F_{тр.п}$ будет превалировать.

Таким образом, вторая схема, при которой упругие деформации заготовки ограничены по величине, позволяет осуществлять процесс фрезерования более спокойно по сравнению с первой схемой.

Третья схема (см. рис. 3) предусматривает размещение в зоне резания фрикционного ролика δ , установленного на подшипнике качения. В результате этого упругие деформации заготовки будут ограничены, а перепады сил трения – уменьшены.

Вследствие изменения силы Q и изгибающего момента M по синусоидальному закону радиальная составляющая силы резания может быть представлена в виде постоянной P_y и переменной $\Delta P_y \sin(\varphi_1 + \omega t)$ величин. Силы $Q_{р2}$ и $Q_{р5}$ определяются настройкой станка путем предварительного сжатия пружин. Поскольку заготовка имеет дополнительную опору в виде ролика, установленного на подшипнике качения, то сила трения в опоре ролика незначительна. Поэтому ударный импульс, нанесенный на заготовку единичным резом, воспринимается малой силой трения, противодействующей силе резания, что приводит к выборке зазоров в кинематических элементах цепи подачи и упругому закручиванию валов под действием крутящего момента резания.

После выхода режущего зуба из контакта с заготовкой крутящий момент резания становится равным нулю. Начинают действовать упругие силы, которые суммируются с усилием подачи F_v и вызывают увеличение скорости движения заготовки к режущему инструменту. Взаимодействие очередного зуба фрезы с заготовкой происходит в неблагоприятных условиях, когда скорость подачи заготовки относительно инструмента максимальная.

Заготовка под действием переменных сил приходит в колебательное движение в горизонтальной плоскости относительно режущего инструмента, при этом высока вероятность совпадения собственной частоты с частотой внешнего динамического воздействия.

Создается ситуация, аналогичная для первой схемы, с той лишь разницей, что при первой схеме резонансные колебания протекают в вертикальной плос-

кости, а при третьей схеме – в горизонтальной. Процесс фрезерования становится неустойчивым.

Результаты теоретического анализа проверены экспериментально. Фрезеровали горбыль естественной влажности сосновых пород длиной 2 м и шириной 200 мм фрезой, оснащенной режущими зубьями из инструментальной стали Р6М5. При обработке заготовок без дополнительной опоры наблюдались резонансные явления, заготовка совершала интенсивные колебания в вертикальной плоскости. Наблюдались отдельные случаи выхода заготовки из контакта с фрезой в направлении, обратном направлению рабочей подачи, после чего заготовка с увеличивающейся скоростью подачи двигалась навстречу к режущему инструменту. Происходил удар фрезы по заготовке, в результате которого заготовка вновь выходила из контакта с фрезой.

После осмотра мест контакта установочной базовой поверхности заготовки с приводными вальцами, было обнаружено, что следы врезания в дерево зубьев приводных валцов отсутствовали, т.е. происходило срезание "зубьев" древесины, сформировавшихся вдавливанием рифлений металлических валцов. Такой процесс обработки прекращали.

При третьей схеме срезания зубьев древесины не наблюдалось, но процесс фрезерования протекал при высоком уровне вибрации, что объясняется недостаточной силой сопротивления быстрому упругому восстановлению элементов кинематической цепи подачи. Такой процесс также характеризовался интенсивными ударами инструмента о заготовку. Для создания сил трения, препятствующих появлению резонансных колебаний в зоне обработки, предусмотрели тормозной момент в цепи подачи, однако этот путь усложняет привод подачи заготовки и требует затраты дополнительной энергии для его преодоления в процессе обработки. Это приводит к дополнительному расходу энергии.

Таким образом, анализ процесса механической обработки анизотропных заготовок с установкой в зоне резания дополнительных опор показал, что стабильные условия обработки в наибольшей степени обеспечиваются опорой, выполненной в виде металлической пластины, вследствие чего она использована в конструкции разработанного станка [1, 2].

Библиографический список

1. Пат. № 44279 Российская Федерация, МПК В27С, 1/08. Станок для обработки горбыля / А.А. Фомин, В.Г. Гусев: заявл. 29.10.2004; опубл. 10.03.2005. Бюл. № 7.
2. Пат. № 2279973 Российская Федерация, МПК В27С, 1/00. Способ обработки горбыля / А.А. Фомин, В.Г. Гусев: заявл. 10.04.2006; опубл. 20.07.2006. Бюл. № 20.



УДК 621.9.06

И.Б. Челпанов, д-р техн. наук, профессор, Заслуженный деятель науки РФ (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет),
А.В. Кочетков, д-р техн. наук, профессор (Пермский национальный исследовательский политехнический университет, ООО "Научно-исследовательский центр технического регулирования")
E-mail: soni.81@mail.ru

Совершенствование методов виброиспытаний с применением вибростендов

Рассмотрены вопросы совершенствования конструкций и методов использования стендов для создания прямолинейных перемещений, вибростендов и вибраторов.

Questions of improvement of designs and methods of use of stands for creation of rectilinear movings, vibrastands and vibrators are considered.

Ключевые слова: метрология, испытание, робот, схема измерения, точность, качество, сертификация.

Keywords: metrology, test, robot, measurement scheme, accuracy, quality, certification.

Отличие предлагаемой постановки задачи от уже известных

Виброиспытания являются наиболее распространенным видом испытаний на механические воздействия, по нескольким причинам [1]:

- 1) они предусмотрены практически во всех стандартизованных программах;
- 2) при вибрации в первую очередь проявляется большинство недоработок испытываемых объектов;
- 3) соответствующее испытательное оборудование – вибростенды – широко распространено.

Наиболее распространен такой способ виброиспытаний, при котором объект, установленный на стол вибростенда, связанного с приводом того или иного типа, совершает вынужденные прямолинейные колебания, вибрации по синусоидальному или по другому закону. Такой способ задания вибраций, который можно назвать кинематическим, характеризуется тем, что основание объекта жестко связано звеном с приводом. Для больших объектов, которые не могут быть установлены на стол, используют другой способ виброиспытаний с помощью пристраивания к ним вибраторов, он кратко рассмотрен в конце этого раздела.

Большинство вибростендов предназначены для испытаний на прочность, вибростойкость и надежность, поэтому к ним не предъявляют высоких требований по точности. Градуировочные вибростенды, предназначенные для испытаний акселерометров, существуют, однако их точность невысока (относительные погрешности по амплитуде порядка 1 %) и используются они редко.

Постановка задачи и предлагаемый метод ее решения

Независимо от схемного решения и конструктивного выполнения основные требования к вибростендам при синусоидальном законе изменения ускорения по определенной оси

$$W(t) = w_0 \sin \omega t \quad (1)$$

исходно задаются по диапазонам двух основных параметров: по амплитуде виброускорения w_0 и по круговой частоте ω (или чаще по частоте $f = (2\pi)^{-1} \omega$, измеряемой в герцах).

Наряду с указанными часто представляют интерес выражаемые через них два параметра: амплитуда виброскорости $v_0 = w_0 \omega^{-1}$ и амплитуда виброперемещения $s_0 = w_0 \omega^{-2}$. При проектировании стендов наиболее важными являются требования по частоте f , амплитуде силы $F = m w_0$, где m – масса испытываемого объекта, и амплитуде перемещения s_0 .

Условия виброиспытаний для многих классов изделий стандартизованы, можно считать, что общий по разным изделиям диапазон частот составляет 2...2000 Гц, а максимальные амплитуды виброускорений составляют 50...200 м/с², но для некоторых объектов они должны быть значительно больше.

Преимущество развиваемого метода по сравнению с существующими

Чтобы наглядно представить, с одной стороны, требования к виброиспытаниям, а с другой – возможности вибростендов, в областях допустимых режимов

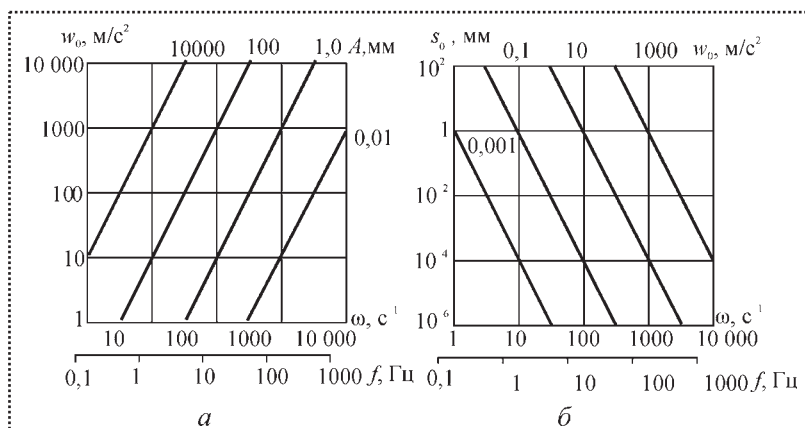


Рис. 1. Линии равных значений амплитуд перемещений (а) и ускорений (б)

в логарифмической сетке строят линии равных значений амплитуд перемещений (рис. 1, а) и амплитуд ускорений (рис. 1, б). Удобство использования тех или иных графиков зависит от того, что именно задает вибростенд: перемещения или приложенную силу [2].

Предположим, стенд непосредственно кинематически задает перемещения. Тогда видно, что при высоких частотах, которые для ряда типов вибростендов трудно воспроизводить, и не очень больших амплитудах виброускорений амплитуды виброперемещений становятся очень малыми (порядка 1 мкм и менее), их трудно наблюдать и измерять. Можно видеть амплитуды таких колебаний только под измерительным микроскопом. С другой стороны, если требуется воспроизводить не очень малые ускорения с низкими частотами (например, порядка 1 Гц и ниже), то для этого требуются большие перемещения, порядка нескольких метров и более.

Вибростенды чаще всего классифицируют по типу привода. Самые простые и в прошлом широко распространенные – электромеханические стенды с вращательным приводом (с преобразованием вращения

в возвратно-поступательные перемещения), выполняемые по схемам кривошипно-шатунного механизма (рис. 2, а) или механизма шарнирного многозвенника (рис. 2, б).

В первом случае перемещение объекта прямолинейное, оно задается направляющими, а амплитуда равна радиусу кривошипа. Во втором случае поступательное виброперемещение происходит по дуге окружности, но при достаточно больших длинах звеньев оно близко к прямолинейному. В обоих случаях имеют место некоторые отличия от синусоидального закона изменения ускорения, в ответственных случаях их необходимо учитывать.

Частоту вибраций регулируют изменением угловой скорости ω . Без переналадки механизма (без изменения длин звеньев) амплитуда виброускорения пропорциональна ω^2 , как это видно из рис. 1, а. Если требуются независимые изменения амплитуды ускорения, необходимо изменять длину кривошипа, для чего стенд приходится останавливать и осуществлять регулировку. Многочисленные предложения по конструкциям, в которых можно было бы изменять длину кривошипа (наиболее распространенной является схема объединения двух эксцентриков) приводят к усложнению и снижению надежности стендов.

Для наглядного представления возможностей стендов данного типа на рис. 3, а в параметрах "частота–ускорение" изображены типовые конфигурации двух областей: большая область 1 в виде прямоугольника и меньшая, заштрихованная область 2 режимов, возможных для типового стенда. Подразумевается логарифмическая сетка.

Наиболее существенными являются ограничения справа по угловой скорости кривошипа (при частоте вращения обычных двигателей 3000 мин^{-1} или 50 Гц) и слева наверху. Срезанный слева угол отражает ограничение на амплитуду перемещений. Кроме того, может быть еще ограничение: при увеличении частоты на изгибных колебаниях могут резонировать звенья механизма, в первую очередь шатун; чтобы избежать этого, приходится увеличивать габаритные размеры сечений и массы подвижных звеньев возрастают. На рис. 3, б показано, как уменьшается область реализуемых режимов, если дополнительно налагается ограничение на создаваемую силу и тем самым на ускорение.

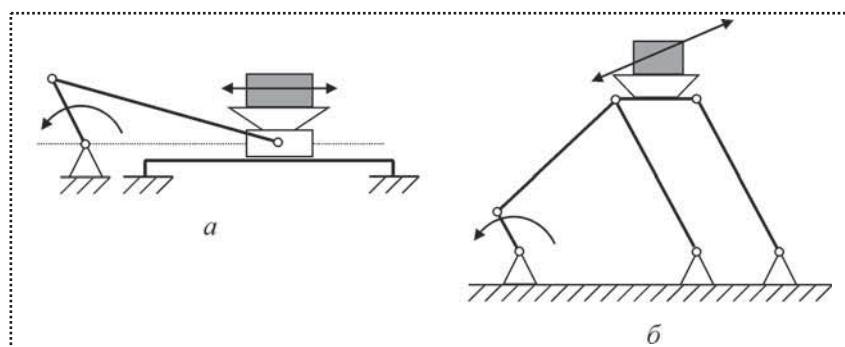


Рис. 2. Электромеханические стенды с вращательным приводом: а – по схемам кривошипно-шатунного механизма; б – по схемам механизма шарнирного многозвенника

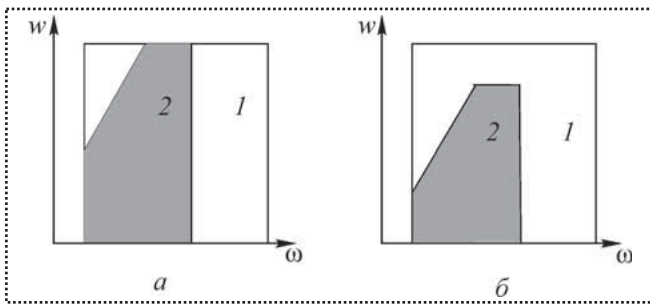


Рис. 3. Типовые возможности стендов

ремещений порядка 0,1 м, но не более. При необходимости получения больших амплитуд ускорений на очень низких частотах (такие соотношения параметров встречаются при движении скоростных объектов, в первую очередь летательных аппаратов) требуемые амплитуды могут составлять десятки метров. Но стенды с кривошипно-шатунными механизмами или шарнирными двухзвенниками могут быть выполнены с длинами звеньев (в виде ферм) максимум порядка 3...4 м, для больших перемещений механизмы этих типов заведомо не применимы.

Было много предложений по стендам на большие перемещения при колебательных движениях. Разрабатывали и создавали стенды с автономными тележками, перемещающимися по направляющим (рельсам) и оснащенные установленными на них самостоятельными мощными приводами. Обычный колесный привод, подобный железнодорожному, при фрикционном взаимодействии колес с рельсами вследствие ограниченности сил трения даже при всех ведущих осях не позволяет получать ускорения выше 1 м/с^2 . Большие ускорения можно получать при использовании тросового привода с замкнутым контуром. Аналогичные ограничения, но менее жесткие, существуют при использовании других типов колесных шасси (линейные ускорения можно повышать примерно до 5 м/с^2). Использование приводов с зубчатыми колесами, сцепляющимися с неподвижными рейками, в принципе возможно, и это позволило бы получать большие ускорения, но при этом конструкция становится очень громоздкой, нуждается в сложной наладке при монтаже, а при работе обычно возникают вибрации, особенно при больших линейных скоростях.

Определенные перспективы имеют стенды с бесконтактным подвесом подвижной каретки. Подвес может быть аэростатическим и магнитным, а движущую силу целесообразно создавать линейным электродвигателем, у которого полюса статора расположены вдоль пути, подвижная магнитная система на каретке может быть пассивной (постоянный магнит) или активной (с обмоткой подмагничивания). Поскольку существуют многокилометровые линии без-

рельсового транспорта на воздушной подушке, в стендах перемещения являются практически неограниченными, но становятся существенными ограничения по скоростям.

При больших амплитудах и частотах электромеханический привод с кривошипно-ползунным механизмом (см. рис. 2, а) работает в тяжелых условиях знакопеременной нагрузки. Для уменьшения неравномерности вращения приходится использовать тяжелые маховики, утяжеляющие конструкцию. Кроме того, стенды рассматриваемого типа обладают высокой виброактивностью, которая на невысоких частотах не может быть заметно снижена с помощью системы амортизации. Известны приемы такого усложнения системы, при котором обеспечивается приемлемый уровень уравнивания (рис. 4).

В обоих вариантах объединено два по два кривошипно-ползунных механизма, у которых оси перемещений составляют углы соответственно 180° и 90° , так что одновременно испытываются два объекта. В схеме, показанной на рис. 4, а, ползуны движутся в противоположные стороны с равными скоростями и ускорениями, поэтому по линии их перемещения не возникают силы воздействия на основание. В схеме, показанной на рис. 4, б, дополнительно на приводном валу крепится противовес; при определенном образом выбранном статическом моменте противовеса обеспечивается уравнивание всего механизма и одновременно устраняется переменность момента сопротивления на валу привода. Вследствие этого может быть значительно уменьшена мощность двигателя. В схеме стенда, пока-

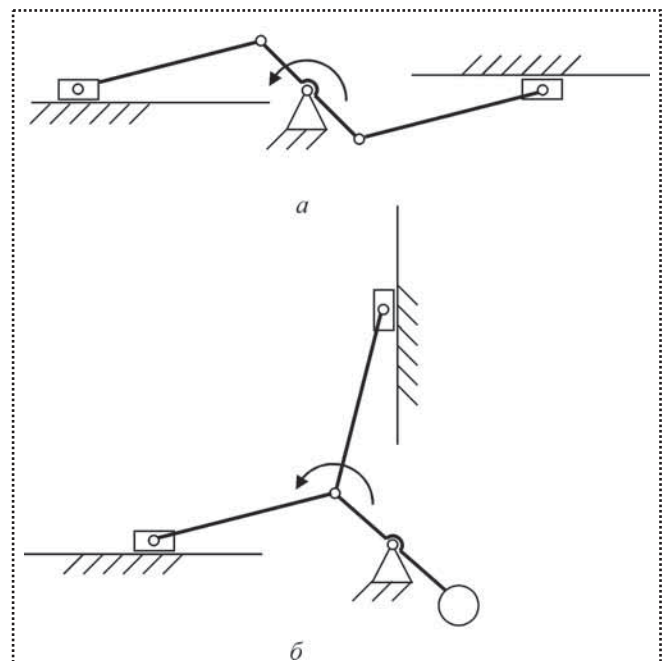


Рис. 4. Системы с уравниванием



занной на рис. 4, б, реализуется идея рекуперации энергии — происходит "перекачка" кинетической энергии: разгон звеньев одного механизма происходит за счет замедления движения другого.

Уменьшение мощностей привода за счет рекуперации, но с использованием переходов кинетической энергии в потенциальную и обратно возможно в так называемых резонансных стендах. В таком стенде стол с испытуемым объектом закрепляют на упругом пружинном подвесе; привод (кинематический или силовой) вводит эту упругую систему в резонанс. Возможна работа в режиме автоколебаний, когда привод управляется через усилитель самим колебательным процессом.

Однако при этом испытания могут производиться без переналадки только на одной, резонансной частоте, которая к тому же зависит от массы объекта. Кроме того, определенные трудности представляет регулировка амплитуды. Изменение частоты достигается заменой пружин или их подключением и отключением, что также усложняет процедуры испытаний. Поэтому подобные стенды практически применимы только при исследовательских испытаниях, когда достаточно выявлять только качественные характеристики испытуемых объектов при вибрациях.

Очевидно, что установка объектов на стол возможна при ограниченной массе и габаритных размерах объекта. Для виброиспытаний объектов больших масс, которые физически не могут быть установлены на вибростенд, и фрагментов таких объектов используют способ пристраивания средств задания вибрационных воздействий: подвижная часть, выходное звено устройства, создающего вибрации (это устройство уже называется не вибростендом, а вибратором) подсоединяется к объекту.

При кинематическом способе задания вибраций, когда указанное соединение является жестким, часто требуется задавать одновременно воздействия в разных точках (на разных частотах, или на одной частоте, в последнем случае — с фазовым сдвигом). Тогда к этим разным точкам свободно установленного или подвешенного объекта присоединяют выходные звенья несколько вибраторов, это может быть имитацией реального нагружения, когда силы действуют в разных точках.

Схему, представленную на рис. 5, а, широко используют при испытаниях колесных транспортных

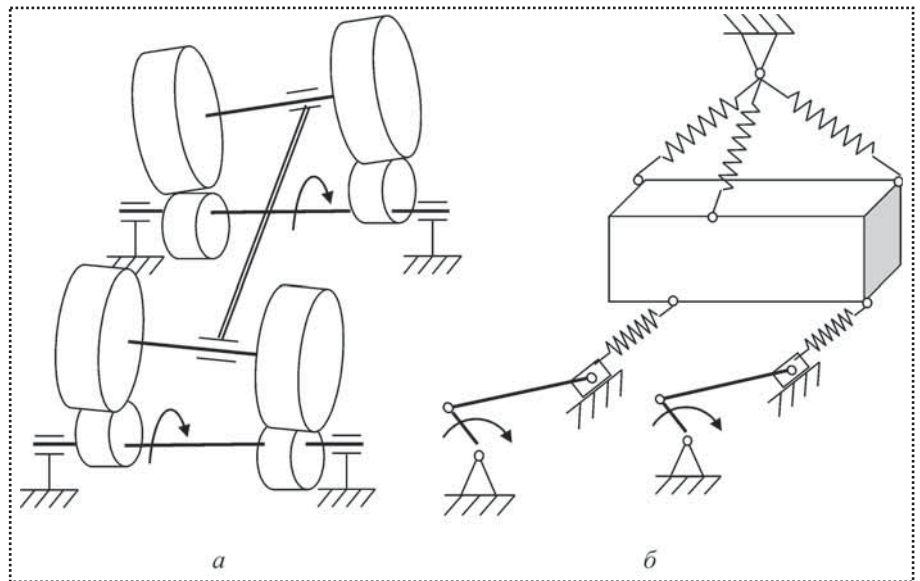


Рис. 5. Схемы испытаний

средств. Шасси устанавливают четырьмя колесами на вращающиеся эксцентрики. Можно независимо регулировать относительные углы разворота эксцентриков при одной и той же угловой скорости, или задавать различные скорости вращения при постоянных амплитудах перемещений. Таким образом имитируется езда по неровной дороге.

Другой способ, называемый силовым, применяют в случаях, когда испытуемый объект также имеет большие габариты и не может быть установлен на стол, а кроме того, привод вибратора не в состоянии задавать требуемые перемещения ввиду большой массы объекта (рис. 5, б). Этот способ заключается в том, что последнее звено механизма, совершающее колебательные движения, связывают упругим звеном (пружиной) с объектом, который свободно подвешен; пружина при деформировании задает переменное усилие. Таких механизмов может быть несколько, они могут быть синхронизированы или несинхронизированы.

При механическом принципе создания вибраций существует еще третий принцип создания вибрационных воздействий — динамический, когда используют силы инерции и нет связи вибратора с жестким основанием. Такой динамический вибратор устанавливают на испытуемый объект. Простейшей является схема с одним неуравновешенным ротором (рис. 6, а) при вращении ротора создается круговое вибрационное воздействие, иногда, особенно при исследовательских испытаниях, это вполне допустимо.

Обсуждение полученных результатов

Если, как обычно при регламентированных испытательных воздействиях требуются однонаправленные

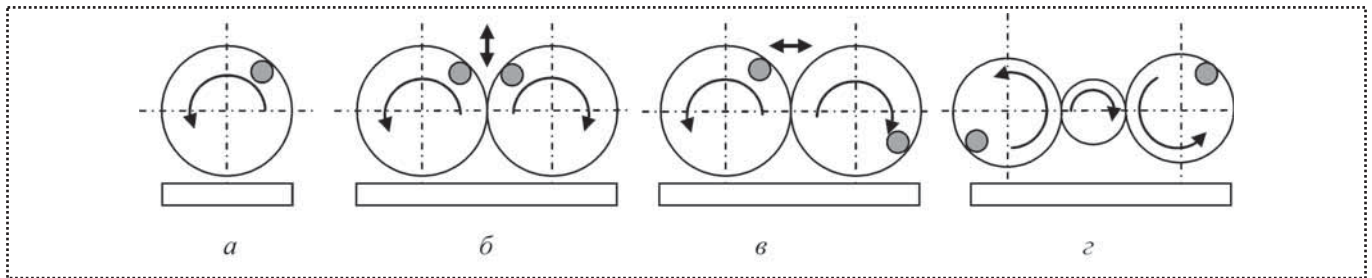


Рис. 6. Динамическое создание вибрационных воздействий

вибрации, электромеханические вибраторы с вращательным электроприводом обычно строят на основе зубчатой передачи с единичным передаточным отношением. Одинаковые неуравновешенные массы m на одинаковых валах, вращающихся в противоположные стороны, имеют одинаковый эксцентриситет r . При подобранном угле относительного разворота колес, вращающихся с постоянной угловой скоростью в противоположные стороны, центр неуравновешенных масс совершает синусоидальные колебания по горизонтали (рис. 6, в) или по вертикали (рис. 6, б). При нахождении на неподвижном основании или на объекте, упругими перемещениями поверхности которого можно пренебречь, вибратор прикладывает к нему силу, изменяющуюся по синусоидальному закону:

$$F(t) = 2mr\omega^2 \sin \omega t. \quad (2)$$

Подобные вибраторы в прошлом широко использовали для выполнения некоторых технологических операций, в частности, для уплотнения смесей в формах и для виброзабивки свай в грунт. Можно также создавать момент сил, для этого должна быть вставлена промежуточная шестерня так, чтобы вращение происходило в одну сторону (рис. 6, г). Увеличивая число шестерен на валах с неуравновешенными массами, находящихся в зацеплении, задавая различные передаточные отношения, можно получать более сложные, полигармонические законы изменения сил воздействия.

Заключение

Силу вибрационного воздействия можно считать по формуле (2), только если виброперемещения объекта под вибратором значительно меньше эксцентриситета, в противном случае амплитуда силы может быть рассчитана при рассмотрении вибратора вместе с объектом, как единой динамической системы [2].

Для протяженных испытуемых упругих объектов, таких как перекрытия, фермы мостов, трубопроводы, планеры самолетов и т.п., приложение вибрационных нагрузок должно осуществляться в большом числе различных точек, при этом встают и решаются задачи автоматизации совместной работы нескольких вибраторов. Можно задавать режим синхронной и синфазной работы, но, если требуется, специальным нарушением синфазности, заданием сдвигов по фазам имитировать, например, бегущую волну. Но при подобных испытаниях предпочитают использовать вибраторы или вибростенды, в которых используют иные физические принципы.

Библиографический список

1. Колпашников С.Н., Тимофеев А.В., Челпанов И.Б. Стандартизация промышленных роботов. М.: Изд-во стандартов, 1990.
2. Кочетков А.В. Динамика промышленных роботов / И.Б. Челпанов, Б.М. Бржозовский, А.В. Кочетков. Саратов: Саратов. гос. техн. ун-т, 1999. 132 с.

Указатель статей, опубликованных в 2012 году

	№		
Ресурс машин и конструкций			
Касьянов П.А. Исследование напряженного состояния в контактах опорно-поворотных устройств драглайнов	7	Дмитриев А.М., Коробова Н.В., Аксененко А.Ю., Толмачев Н.С. Технологичность конструкций создаваемых малогабаритных специализированных прессов.....	11
Черепанов А.П., Черепанов Е.А. Прогнозирование ресурса машин на основе данных по их техническому состоянию	4	Кашуба Л.А. Алгоритмы моделирования геометрии реальной детали	4
Шишкарев М.П., Угленко А.Ю. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения.....	10	Кашуба Л.А. Геометрия изделий машиностроения	6
Экономика и организация сборочного производства			
Александров Б.Ю. Управленческий ресурс как фактор обеспечения эффективности предприятий переработки.....	2	Кашуба Л.А. Геометрия сборки недеформируемых деталей.....	5
Данилов Е.А. Системы поддержки принятия решения в промышленных системах мониторинга	4	Кашуба Л.А. Реальная геометрия детали.....	1
Ицкович И.И., Пономарёв В.А. Экономический анализ сборочных спецификаций газотурбинных двигателей	2	Попов А.М. Повышение сборочной технологичности конструкции изделий в интегрированных системах автоматизированного проектирования	1
Курнасов Е.В. Оценка степени межуровневого взаимодействия информационных потоков производственного предприятия с MES-системой	3	Рябов Г.К., Власов М.В. К вопросу обеспечения собираемости планетарной роликвинтовой передачи	8
Магдиев Р.Р. Расчет критериев эффективности групповых сборочных процессов в многономенклатурном производстве	7	Сборочное оборудование и его элементы	
Пиголкин А.Б., Мусалимов В.М. Современные подходы к оптимизации производства	8	Антонец И.В., Терешенок А.П. Динамометрические весоизмерительные системы с демпфирующими устройствами	12
Филипович О.В., Копп В.Я., Гарматюк М.И. Имитационная модель процесса однопараметрической селективной сборки.....	5	Гордеев А.Ф., Захаров П.А., Четвержук Т.И. Идентификация и моделирование деформационных свойств стыков металлорежущих станков	11
Технологичность конструкций			
Бойкачев В.Н., Поспелов В.Н., Муравьев А.А. Экспериментальный источник питания анода стационарного плазменного ракетного двигателя	10	Ланщиков А.В., Колганов Е.А. К вопросу затяжки резьбовых соединений пневматическими поршневыми гайковертами	1
Вартанов М.В., Осипов А.С., Безручкин В.В. Автоматизация расчета производственной технологичности крупногабаритных изделий машиностроения	9	Микаева С.А., Железникова О.Е., Сеницына Л.В. Оборудование для световых измерений	9
Григорьев И.В., Маликов А.А., Ямников А.С. Технологический размерный анализ рычажного механизма.....	7	Трегубов А.В., Ладыгина О.М. Шпули на гибких основах, способ и устройства для их наматывания	2
		Современные технологии сборки	
		Герасин А.А., Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е. Анализ осевой составляющей силы отталкивания в многокольцевых магнитных подшипниках с осевым направлением намагниченности	10
		Демин А.А., Титов И.А., Шанулин Е.В. Повышение качества сборки соединений с натягом при увеличенном допуске на изготовление деталей	7
		Жарков Г.Е., Прилуцкий В.А. Саморегулирование положения подвижной детали при сборке.....	9
		Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Классификация способов надежной доориентации узлов и деталей при автоматизированной сборке.....	2



Королев А.В., Болкунов В.В., Мирошкин А.Г. Технология сборки радиально-упорных шариковых подшипников с охлаждением внутреннего кольца	7
Корчак Е.С. Обеспечение быстрого и эффективного монтажа станин гидравлических прессов колонного типа	12
Кристалль М.Г., Харькин О.С. Устройство контроля и многодиапазонной сортировки деталей с программируемой системой управления	2
Кузнецова С.В., Симаков А.Л. Математическая модель процесса адаптации положения детали при автоматизированной сборке	5
Медарь А.В. Инновационные технологии сборочного производства изделий специального машиностроения	12
Медведев А.М., Мылов Г.В. Ультразвуковая очистка электронных сборок	11
Набатников Ю.Ф. Метод селективной сборки соединений деталей машин в условиях мелкосерийного производства	9
Павлин В.Н., Голубев С.В., Новинский Э.Г., Головкин В.Ф. Опыт изготовления барабанов отработавших сборок для перегрузочного комплекса 4-го энергоблока Белоярской АЭС	7
Редин В.Н., Аббясов В.М. Разработка метода оценки нагруженности элементов технологических роботизированных комплексов	5
Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Алгоритм решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал-втулка" по методу межгрупповой взаимозаменяемости	9
Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Анализ собираемости изделий типа "вал-втулка" при селективной сборке	1
Чернявский С.Н., Безрукова Т.В., Кристалль М.Г. Устройство для ротационной сборки роликовых подшипников	4
Черняховская Л.Б., Симаков Д.А. Кинематика и динамика процесса сборки цилиндрических деталей	1
Широкий А.В., Кристалль М.Г. Моделирование процесса пассивного ориентирования деталей в вибрационных бункерных загрузочных устройствах	5
Технологическая оснастка для сборки	
Березин С.Я., Охрименко М.И. Управление устойчивостью положения инструмента или крепежной детали в начальный момент сопряжения	3
Гоцеридзе Р.М., Румянцев С.В. Устройство для статической балансировки изделий	11

Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Ручной одношпindelный гайковерт ударного действия повышенной точности с системой контроля осевых сил затяжки резьбовых соединений	6
Житников Ю.З., Житникова И.В. Ручные одношпindelные гайковерты на основе муфт предельного момента повышенной точности осевых сил затяжки	4
Иванов А.А. Координатная система точного позиционирования объекта в нанометрическом диапазоне	12

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Зверев С.В. Пайка конструкций из высокопрочных сталей с сотовым наполнителем	2
Журавлев А.Н., Утянкин А.В. Исследование влияния технологических параметров сборочно-сварочных операций на точность буровых алмазных долот	6
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Влияние внешних воздействий на процесс пайки	6
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка без припоя	7
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка высоколегированных сталей и сплавов	12
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка как вспомогательный процесс	8
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Пайка стали и чугуна	9
Карабанов В.В., Бохоров И.О. Реактивные процессы при пайке	4
Ковтунов А.И., Чермашенцева Т.В., Селянин П.Н. Технология сварки сталей, покрытых алюминием, проволокой из аустенитной стали	3
Микаева С.А., Петренко Ю.П., Микаева А.С., Железникова О.Е., Сеницына Л.В. Металлокерамический припой	12
Семйон Я., Янош Р., Гайдук М., Вархола М., Вагаш М., Балаж В. Модульный принцип проектирования сварочных приспособлений для роботизированных ячеек	7
Шпилов А.В., Ерофеев В.А., Полосков С.И. Оценка влияния погрешностей сборки на качество сварных соединений при орбитальной сварке трубопроводов малых диаметров	3

Сборка с использованием клеев

Безменов В.С., Игнатов А.В. Автоматизация сборки клеевых соединений в машиностроении с высоковязкими и пастообразными клеевыми композициями	1
--	---



Щербаков В.И., Круглов К.М., Аксенов Д.В., Шкурко Л.С. Сравнительная оценка вибродемпфирующих характеристик панелей, выполненных с применением клея 3

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Волчеквич И.Л. Обеспечение потребностей сборки при изготовлении деталей машин 2

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Албагачиев А.Ю., Кушнир А.П. Влияние погрешностей установки на герметичность бесконтактных уплотнительных устройств 3

Антонюк В.С., Мережаный Ю.Г., Пономаренко А.И. Автоматизированный контроль микроклимата производственных помещений для сборки прецизионных приборов 2

Безъязычный В.Ф., Федулов В.М. К вопросу технологического обеспечения качества соединений деталей при сборке с гарантированным натягом 6

Белоусова Е.В., Богданов В.И., Яцелтов А.В. Создание и опыт доводки опор с газовой смазкой высокоскоростного турбинного привода 10

Бойкачев В.Н. Создание и внедрение системы сертификации качества электронной компонентной базы космического приборостроения 8

Вязовский В.В., Пшеничный А.Г., Райко А.В. Разработка метода активного контроля вакуумных свойств диффузионных соединений 8

Голикова В.В., Первухина Е.Л. Совершенствование процедур контроля качества сборки машиностроительных изделий по диагностическим параметрам 3

Горелов А.С., Прейс В.В. Управление качеством автоматизированной сборки многоэлементных изделий массового выпуска на основе статистических методов 1

Гоцеридзе Р.М. Определение остаточных силы тяжести или плавучести и момента дифферента поплавковых чувствительных элементов гироприборов 9

Гоцеридзе Р.М., Румянцев С.В. Применение балансировочного станка с магниторезонансным подвесом для измерения параметров уравновешенности поплавковых чувствительных элементов 12

Камалдинов А.М., Сурженко М.С., Аксенов Е.Г. Измерение малых вращающих моментов силы для контроля качества сборки изделий РКТ 8

Карабань В.Г., Кристаль М.Г., Коротков А.В. Выбор показателей качества средств измерений дис-

кретных элементов при сборке механизмов свободного хода бесступенчатых передач 10

Карабань В.Г., Кристаль М.Г., Коротков А.В., Марчук Д.В. Обеспечение точности при сборке клиновых механизмов свободного хода бесступенчатых передач 8

Кесоян А.Г., Коцюба С.А. Влияние точности сортировки деталей на эффективность прецизионной сборки 11

Печагин А.П., Болдырев А.И., Климова Г.Н. Стабилизация геометрии литых чугунных и стальных сборных конструкций путем воздействия электромагнитными импульсами 6

Резник С.В., Денисов О.В., Тимошенко В.П. Особенности техники тепловых испытаний элементов натуральных стержневых космических конструкций 3

Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Определение вероятности получения бракованных сопряжений при селективной сборке изделий типа "вал-втулка" по действительным значениям сопрягаемых параметров 5

Фомин А.А. Обеспечение микрогеометрии поверхностей при обработке заготовок с неоднородными свойствами 12

Челпанов И.Б., Кочетков А.В. Методы и средства создания нагружения и измерения параметров нагружения при испытаниях 12

Шаломов В.И. О влиянии некоторых параметров газовых опор на выходные характеристики шпиндельных узлов шлифовальных станков 3

Шашурин В.Д., Ветрова Н.А., Мешков С.А. Обеспечение надежности смесителей радиосигналов на резонансно-туннельных диодах на этапе их сборки 7

Шкурко Л.С., Смолв Ю.А., Варганов М.В., Зинина И.Н. Автоматизированный стенд для испытаний уплотнений автомобильных агрегатов 5

Экология и безопасность сборочных работ

Микаева С.А., Микаева А.С. Установки для обеззараживания воздуха и воды 5

В помощь конструктору, технологу

Васильев А.С., Грязев В.М., Ямников А.С. Функционально связанные сборочные размерные цепи, обеспечивающие нормированный контакт поверхностей 5

Ковалев В.Г., Ковалев С.В. Предельные величины силовых и геометрических параметров при электромонтаже методом накрутки 8



Коган Б.И., Буялич Г.Д., Буялич К.Г. Технологическое обеспечение надежности цилиндров гидростоек механизированных крепей.....	10
Магдиев Р.Р. Методика моделирования технологической системы сборки.....	3
Матросова Ю.Н. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования типовых технологических процессов деталей "втулка", "вал"	4
Матросова Ю.Н. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования фасонных фрез.....	7
Матросова Ю.Н., Буянов И.В. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования регуляторов давления газа	3
Матросова Ю.Н., Малова Е.С. Программное обеспечение для автоматизированного проектирования фрез.....	1
Матросова Ю.Н., Федотов М.В. Моделирование устройства для автоматизированной сборки изделий	6
Набатников Ю.Ф. Моделирование сборки соединений деталей машин на ЭВМ	11
Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е. Математическая модель бесконтактного аэродинамического транспортного средства.....	11
Шаломов В.И. Влияние удлинения бесконтактных опор на выходные характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов	10
Шевелев В.В. К вопросу поиска оптимальных условий при проектировании групповых болтовых соединений при действии внешней силы в плоскости стыка	11

Шестаков В.С., Савинова Н.В., Орочко А.В. Расчет напряжений в элементах оснований конусных инерционных дробилок.....	11
---	----

Зарубежный опыт

Гайдук М., Пахникова Л., Сукоп М., Варга Й. Стратегии производства в настоящее время	11
---	----

Информация

Иванов А.Н. Международная выставка оборудования, технологий и продукции металлургической промышленности "Металлургия – Литмаш-2012"	10
Иванов А.Н. МІТЕХ-2011	4
Промышленные достижения на Петербургской технической ярмарке 2012	5
Указатель статей, опубликованных в 2011 году.....	1
Условные обозначения покрытых электродов.....	2
75 лет А.А. Гусеву.....	2

Нормативная документация

Медведев А.М., Мылов Г.В. Современные требования к электронным сборкам	10
---	----

Соединение деталей машин

Житникова И.В. Обоснование момента сопротивления в резьбе при ударной затяжке резьбовых соединений.....	10
--	----

Страницы истории

Березин С.Я., Романова Л.С. Исторические и технические пути развития вспомогательной оснастки для резьбообразования и сборки	8
---	---

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский 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 08.11.12 г. Подписано в печать 26.12.12 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство **Машиностроение**".

Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, г. Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.