

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

4 2009
(105)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкций

Безъязычный В.Ф., Надеждин И.В. Проектирование узлов топливной аппаратуры дизельных двигателей с учетом особенностей технологии автоматической сборки . . . 3

Современные технологии сборки

Труханов В.М., Крыхтин Ю.И. Технология изготовления и сборка заготовок фрикционных дисков с комбинированной поверхностью трения методом автоматизированного плазменного напыления 6

Григорьева Н.С. Гибкие модульные сборочные технологии 11

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Васильев А.С., Кондаков А.И. Прогнозирование изменений показателей качества при изготовлении деталей наукоемких изделий 20

Штенников В.Н. Рекомендации по обеспечению требуемых режимов конвекционной пайки 23

Виноградова О.В., Шишкин В.Н. Системообразование структурно-параметрических моделей в задачах совершенствования эксплуатационных характеристик авиационного ГТД 25

Хейфец М.Л., Лысов А.А., Кусакин Н.А., Премент Г.Б. Управление наследованием показателей качества при восстановлении, обработке, сборке и эксплуатации деталей машин 30

Шеховцева Е.В. Исследование контактной усталости цилиндрических зубчатых колес 35

Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В., Молтенинов А.В., Булчевский Ю.В., Карпов С.Ю., Двухжилов Д.В., Щелканов А.В. Стендовая система входной вибродиагностики подшипников качения 38

Ланщиков А.В., Селиверстов А.А. Диагностическое обеспечение операций сборки резьбовых соединений 43

Шабайкович В.А. Опережающая оценка качества и конкурентоспособности изделий при гибкой автоматической сборке 46

В помощь конструктору, технологу

Гольдин А.С. Тепловой баланс ротора 52

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

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

Региональные редсоветы

АСТРАХАНЬ	ОРЕНБУРГ
В.В. МИКИТЯНСКИЙ	А.Н. ПОЛЯКОВ
БЕЛГОРОД	А.И. СЕРДЮК
Н.А. ПЕЛИПЕНКО	А.П. ФОТ
БРЯНСК	РЫБИНСК
О.А. ГОРЛЕНКО	В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
ВЛАДИВОСТОК	В.В. НЕПОМИЛУЕВ
Ю.Н. КУЛЬЧИН	А.Н. СЕМЕНОВ
А.А. СУПОНЯ	САМАРА
В.М. КОРНИЕНКО	М.В. ЕВДОКИМОВ
ВОЛГОГРАД	Ю.А. ВАШУКОВ
В.Г. КАРАБАНЬ	Г.А. КУЛАКОВ
М.Г. КРИСТАЛЬ	В.А. НИКОЛАЕВ
В.И. ЛЫСАК	САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.М. ТРУХАНОВ	В.Ф. КУЗЬМИН
ИЖЕВСК	Е.В. ШАЛОБАЕВ
И.В. АБРАМОВ	ТОЛЬЯТТИ
Б.А. ЯКИМОВИЧ	А.И. РЫЖКОВ
В.Г. ОСЕТРОВ	Б.Ф. ХАЗОВ
И.К. ПИЧУГИН	ХАБАРОВСК
КАЗАНЬ	В.А. ЛАШКО
Р.И. АДГАМОВ	Украина
КОВРОВ	КИЕВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ	А.С. ЗЕНКИН
КОЛОМНА	В.А. МАТВИЕНКО
Ю.Д. АМИРОВ	ДОНЕЦК
КОМСОМОЛЬСКИЙ-НА-АМУРЕ	А.Н. МИХАЙЛОВ
Б.Н. МАРЫН	СЕВАСТОПОЛЬ
В.И. ШПОРТ	Е.Л. ПЕРВУХИНА
А.М. ШПИЛЕВ	ХАРЬКОВ
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ	Б.М. АРПЕНТЬЕВ
С.В. ДМИТРИЕВ	Беларусь
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ	МИНСК
ОМСК	В.Л. БАСИНЮК
В.Н. КОСТЮКОВ	ГОМЕЛЬ
ОРЕЛ	В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
Ю.С. СТЕПАНОВ	ПОЛОЦК
Г.А. ХАРЛАМОВ	М.Л. ХЕЙФЕЦ

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Н.М. КУЦ-ЖАРКО, Л.В. САВЕЛЬЕВА

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; tsmm@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

4 2009
(105)

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Beziazyshny V.F., Nadezhdin I.V. The design of fuel equipment joints of diesel engines with a glance automatic assemblage technology feature 3

Modern technologies in assembly

Tryhanov V.M., Krihtin U.I. Technology of manufacturing and assembly of preparations of frictional discs with the combined surface of friction by a method automated plasma raises 6

Grigoryeva N.S. Flexible module assembling technologies 11

Quality assurance. Testing. Monitoring

Vasil'ev A.S., Kondakov A.I. Perfection factors changing prediction in science intensive components manufacturing 20

Shtennikov V.N. Recommendations of the hot gas soldering 23

Vinogradova O.V., Shishkin V.N. The network of structure-parametric models in aviation gas-turbine engines improvement problems 25

Heyfets M.L., Lysov A.A., Kusakin N.A., Prement G.B. Control of machinery quality parameter inheritance during restoration, working, assembly and operation of machinery 30

Shekhovtseva E.V. Spur gears contact fatigue research 35

Kostyukov V.N., Boichenko S.N., Kostyukov A.V., Molteninov A.V., Buluchevskiy U.V., Karpov S.U., Dvukhzhilov D.V., Shchelkanov A.V. Stand system for rolling bearings acceptance vibrodiagnostics 38

Lanshichikov A.V., Seliverstov A.A. Diagnosability provision of screw joint assembly operations 43

Shabaykovich B.A. Advance estimation of quality and competitiveness of products in flexible automatic assembly 46

Industrial and Design Engineer's Aid

Golding A.S. Heat disbalance rotor 52

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

Editors

MOSCOW

VARTANOV M.V.
VASIL'EV A.S.
(Chief editor)
DALSKY A.M.
GUSEV A.A.
ZHESTKOVA I.N.
(Deputy chief editor)
ZININA I.N.
IVANOV YU.L.
KOZYREV YU.G.

KUMENKO A.I.
MEDAR' A.V.
MIKRIN E.A.
NAZAROV Yu.F.
POROSHIN V.V.
SHANDROV B.V.
SHATILOV A.A.
KHOLODKOVA A.G.
YARKOV G.A.

Regional editors

ASTRACHAN

MIKITIANSKI V.V.

BELGOROD

PELIPENKO N.A.

BRIANSK

GORLENKO O.A.

VLADIVOSTOK

KULSHIN Yu.N.
SUPONIA A.A.
KORNIENKO V.M.

VOLGOGRAD

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

IZHEVSK

ABRAMOV I.V.
YAKIMOVICH B.A.
OSETROV V.G.
PITCHUGIN I.K.

KAZAN

ADGAMOV R.I.

KOVROV

ZHITNIKOV Yu.Z.

KOLOMNA

AMIROV Yu.D.

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

MARJIN B.N.
SCHPORT V.I.
SHPILEV A.M.

NABEREZHNYE CHELNY

DMITRIEV S.V.
KHISAMUTDINOV R.M.

OMSK

KOSTIUKOV V.N.

OREL

STEPANOV Yu.S.
KHARLAMOV G.A.

ORENBURG

POLYAKOV A.N.
SERDUK A.I.
FOT A.P.

RYBINSK

BEZIAZYSHNY V.F.
NEPOMILUEV V.V.
SEMENOV A.N.

SAMARA

EVDOKIMOV M.V.
VASHUKOV Yu.A.
KULAKOV G.A.
NIKOLAEV V.A.

ST.-PETERSBURG

KUZMIN V.F.
SHALOBAEV E.V.

TOLIATI

KHAZOV B.F.
RYZHKOVA A.I.

KHABAROVSK

LASHKO V.A.

Ukraine

KIEV

ZENKIN A.S.
MATVIENKO V.A.

DONETSK

MIKHAILOV A.N.

SEVASTOPOL

PERVUKHINA E.L.

KHARKOV

ARPENTIEV B.M.

Belarus

MINSK

BASINJUK V.L.

GOMEL

STARZHINSKI V.E.

POLITSK

KHEIFETZ M.L.

Executive editors of current issue:

KUSH-ZHARKO N.M., SAVELIEVA L.V.

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

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; tsmm@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.

В.Ф. Безъязычный, д-р техн. наук, И.В. Надеждин (Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)

Проектирование узлов топливной аппаратуры дизельных двигателей с учетом особенностей технологии автоматической сборки

Перечислены требования к конструкции и сборочным единицам при сборке на автоматизированном оборудовании. Рассмотрен пример изменения конструкции изделия при разработке технологии его автоматической сборки.

Demands to a construction and subunit when in use assembly on automated machinery have been listed. The change example of construction when in use a development of technology its automatic assembly.

Ключевые слова: технология, автоматическая сборка, форсунка, сборочная единица, конструкция.

Key words: technology, automatic assembly, sprayer, subunit, construction.

По сравнению с операциями механической обработки процессы сборки изделий наиболее трудоемкие для автоматизации. Одна из причин, приводящих к такой ситуации, — высокая точность и сложность выполнения сборочных операций. Кроме того, проектируемые изделия чаще всего мало пригодны для гибкой автоматизированной сборки с минимальными затратами времени и усилий вследствие недостаточной проработки вопросов ориентирования, транспортировки и соединения деталей. В результате происходит усложнение и удорожание сборочных приспособлений, снижается производительность и надежность работы сборочной системы. Поэтому *проектирование с ориентацией на технологию автоматической сборки является актуальной и важной задачей с точки зрения повышения экономической эффективности использования автоматического сборочного оборудования.*

Проектирование с учетом технологии автоматической сборки включает в себя методику системного анализа конструкции изделий [1], пользуясь которым можно выделить следующие **требования к конструкции или ее сборочным единицам при сборке на автоматизированном оборудовании:**

- изделия должны быть разделены на законченные взаимозаменяемые сборочные единицы с возможностью их сборки независимо друг от друга;

- число соединяемых поверхностей и видов соединений должно быть минимальным;
- места соединений сборочных единиц должны быть доступны для контроля качества соединений;
- дополнительные операции доводки, пригонки и регулирования в процессе сборки должны быть исключены;
- должна быть предусмотрена возможность сборки с полной взаимозаменяемостью;
- процесс сборки должен иметь последовательный характер, характеризуемый наличием базовой детали, с которой сопрягаются присоединяемые детали преимущественно сверху;
- должен быть согласован вес присоединяемых деталей с нагрузочной способностью сборочного оборудования;
- следует применять такие сборочные операции, которые можно было бы выполнить одним манипулятором.

Анализ технологических операций сборки с учетом автоматического ориентирования, транспортировки, питания и соединения деталей позволил сформулировать **принципы проектирования деталей**, основные из которых приведены ниже:

- сокращение числа сборочных операций путем объединения деталей;
- исключение операций автоматического ориентирования, используя взамен бункерных магазинные и кассетные накопители; скрепление деталей лентой; введение технологических операций в сборочный процесс;
- упрощение операций ориентирования за счет принятия мер против сцепления деталей; использования симметричных или отчетливо асимметричных деталей высокого качества;
- упрощение транспортировки деталей за счет рационального проектирования и применения несущих приспособлений;
- упрощение траектории перемещения деталей при сборке, предусматривая направляющие эле-

менты (фаски, выступы, лыски и т.п.) и простые соединения;

■ применение адекватных способов соединения: при сопряжении и закреплении резьбовых соединений необходимо стремиться к выполнению сборки одновременно группы деталей (одновременно завинчивая несколько гаек) и в первую очередь к применению винтов, как наиболее технологичных по сравнению со шпильками и болтами; применение технологии однооперационного изготовления укрупненных узлов.

В настоящее время конструирование, моделирование, выпуск конструкторской и технологической документации, разработка управляющих программ и проведение расчетов проводят с помощью интегрированных информационных технологий на основе применения единой CAD/CAM/CAE системы компьютерно-интегрированного производства. Для анализа сборочных конструкций в таких системах используют метод DFA (Design for Assembly), включающий в себя вышеперечисленные принципы конструирования и требования к конструкции и ее сборочным единицам. Применение данного метода приводит к улучшению качества и надежности изделия, снижению количества необходимого основного и вспомогательного оборудования. На рис. 1 представлена последовательность разработки конструкции изделия (на примере форсунки для впрыска топлива дизельного двигателя) и место DFA в этом процессе.

Целью DFA-анализа конструкции форсунки является:

- ◆ оценка технологичности существующей и модифицированной конструкции форсунки;
- ◆ определение наиболее рационального метода сборки;



Рис. 1. Последовательность разработки конструкции в системе компьютерно-интегрированного производства и структура метода DFA (на примере форсунки дизельного двигателя)

- ◆ сравнение двух конструкций форсунки по затратам на сборку;
- ◆ предварительная оценка времени, затрачиваемого на автоматизированную сборку.

Рассмотрим существующую конструкцию форсунки для впрыска топлива дизельного двигателя, детали и сборочные единицы которой показаны на рис. 2.

Конструкция форсунки состоит из 15 деталей, включая 3 сборочные единицы: корпус, распылитель и прокладка-экран. Корпус форсунки включа-

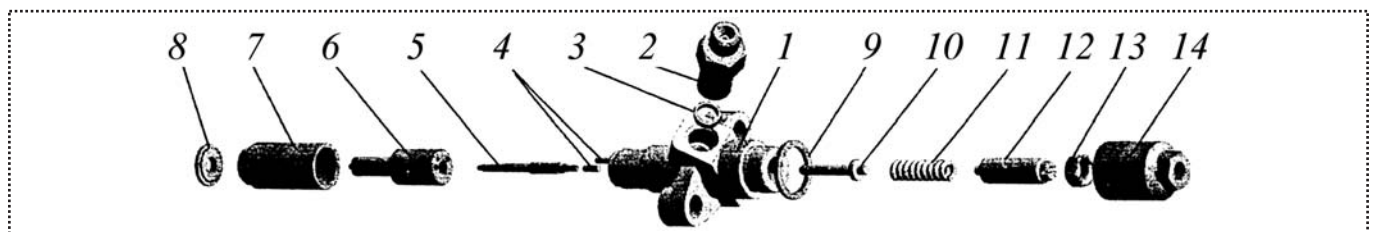


Рис. 2. Детали форсунки для впрыска топлива:

1 – корпус; 2 – штуцер; 3 – направляющие штифты; 4 – штифт; 5 – игла распылителя; 6 – корпус распылителя; 7 – гайка распылителя; 8 – прокладка-экран; 9 – прокладка; 10 – штанга; 11 – пружина; 12 – винт регулировочный; 13 – контргайка; 14 – колпак



ет четыре детали: корпус 1, штуцер 2, прокладку 3 и штифт 4 (2 шт.).

Применение метода DFA позволило выявить слабые стороны конструкции сборочной единицы (корпуса форсунки) и усовершенствовать ее.

При этом, используя принцип проектирования о сокращении числа деталей, входящих в сборку, штуцер 2 объединили с корпусом 1. Прокладку 3 исключили.

Новая конструкция корпуса предусматривает центрирующий буртик на его торце для упрощения процесса автоматизированной сборки с корпусом распылителя 6. В итоге один из направляющих штифтов 4 может быть исключен. Базовая и усовершенствованная конструкции корпуса форсунки приведены на рис. 3.

Таким образом, усовершенствованная конструкция форсунки включает 12 деталей, в том числе 2 сборочные единицы.

В качестве базовой детали при автоматизированной сборке необходимо использовать корпус форсунки, причем положение его в сборочном приспособлении должно быть вертикальным (см. рис. 3, б) для обеспечения сборки присоединяемых деталей за счет сил тяжести.

Для упрощения операций ориентирования при автоматизированной сборке распылителя форсунки с ее корпусом в последнем предусмотрен цилиндрический поясок с центрирующей посадкой скольжения в отверстии для направляющего штифта 4.

У пружины 11 крайние витки должны быть поджаты для исключения возможности сцепления витков соседних пружин при подаче с помощью вибробункерного устройства.

Следующий шаг к сокращению числа деталей, входящих в сборку форсунки, привел к объединению прокладки 9 и колпака 14. Например, прокладку 9 перед сборкой приклеивают к корпусу колпака 14.

Для оценки пригодности деталей проектируемых изделий для автоматизированной сборки разработан тест, с помощью которого можно быстро

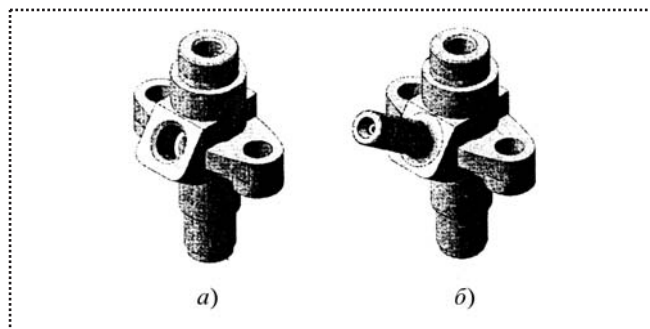


Рис. 3. Примеры проектирования деталей форсунки с учетом особенностей автоматической сборки:

а – корпус форсунки в базовом варианте; *б* – конструкция после модификации

оценивать готовность отдельных деталей, сборочных узлов и всего изделия для автоматической транспортировки и перемещений.

Следует отметить, что тест не дает окончательного вывода о пригодности конструкции детали для автоматизированной сборки, так как не учитывает вид и характеристики оборудования, имеющегося на конкретном сборочном производстве.

Тем не менее, он может выявить конструктивные особенности детали, которые могут усложнить и привести к значительному удорожанию процесса автоматизации сборочных операций.

Вывод

На примере изделий топливной аппаратуры дизельных двигателей показано, что при автоматизации сборочных операций собираемые компоненты должны отвечать возможностям автоматического сборочного и транспортно-загрузочного оборудования.

Проектирование таких изделий должно осуществляться с ориентацией на технологию автоматизированной сборки, что в отдельных случаях позволяет упростить их конструкцию, не нарушая функциональных свойств, снизить затраты и повысить производительность сборочных операций.

Библиографический список

1. **Замятин В.К.** Технология и оснащение сборочного производства машино-приборостроения: справочник. М.: Машиностроение, 1995. 608 с.

В.М. Труханов, д-р техн. наук, Ю.И. Крыхтин (Волгоградский технический университет)

Технология изготовления и сборка заготовок фрикционных дисков с комбинированной поверхностью трения методом автоматизированного плазменного напыления

Рассмотрены вопросы технологических основ разработки заготовок фрикционных дисков с комбинированной поверхностью трения методом автоматизированного плазменного напыления для работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин.

Is devoted to questions of technological bases of development of preparations of frictional disks with the combined surface of friction by a method automated plasma raises for work in oil in transmission knot of transport machines.

Ключевые слова: фрикционные диски, плазменное напыление, трущиеся поверхности.

Key words: frictional disks, plasma raises, rubbing surfaces.

Фрикционные "родственные" металлические пары (сталь—сталь, чугун—чугун и др.), которые находят еще применение при работе со смазкой по причине прочностной и особенно фрикционной эффективности подвижного соединения, характеризуются нестабильным коэффициентом трения, резко понижающимся с повышением скорости скольжения и температуры, склонностью к схватыванию при высоких температурах [1].

Для исключения процессов схватывания на фрикционном стальном контакте, характерных для однородных трущихся материалов, в целях повышения надежности и долговечности работы фрикционных узлов в настоящее время используют новые конструктивные и технологические решения, к которым можно отнести применение пористых фрикционных спеченных материалов и газотермических покрытий [2].

Метод автоматизированного плазменного напыления позволяет получить различные по составу газотермические покрытия, прочно связанные с основным металлом детали. Этот способ позволяет объединить процессы формирования и спекания

конгломерированных частиц на напыленных поверхностях.

В настоящее время самое широкое распространение для работы в масле нашли пористые спеченные фрикционные материалы на основе меди, легированные оловом или цинком, — материал типа МК-5. Фрикционные накладки из этого материала прессуют и спекают с основой под давлением.

Спеченный фрикционный материал МК-5 ТУ 14-1-1291—75 хорошо зарекомендовал себя при работе по стали в условиях смазки в фрикционных узлах трансмиссий транспортных гусеничных и колесных машин. Вместе с тем этот материал имеет ряд недостатков, основными из которых являются:

- ◆ наличие в его составе дорогостоящих компонентов (медь, свинец, олово);
- ◆ низкий коэффициент трения;
- ◆ значительная трудоемкость.

В целях исключения указанных недостатков предлагаются бронзовые газотермические покрытия, наносимые на стальные диски методом плазменного напыления.

На рис. 1 представлена конструкция диска с комбинированной поверхностью трения. Рабочая поверхность такого диска включает в себя чередующиеся участки плотного беспористого стального материала и пористого антизадирного материала. При трении диска в масле со стальным контртелом из стали 65Г с твердостью 285...321 НВ при больших скоростях скольжения и больших удельных давлениях на фрикционном контакте стальные участки диска обеспечивают высокий коэффициент трения, особенно в условиях полусухого трения (в режиме граничного трения). Пористые участки обеспечивают при этом антизадирные качества соединению.

Частицы пористого материала со смазкой при трении переносятся на стальные участки, намазываются на них и препятствуют износу, задирам, прихвату и спеканиям поверхностей трения, что *повышает надежность и долговечность ра-*

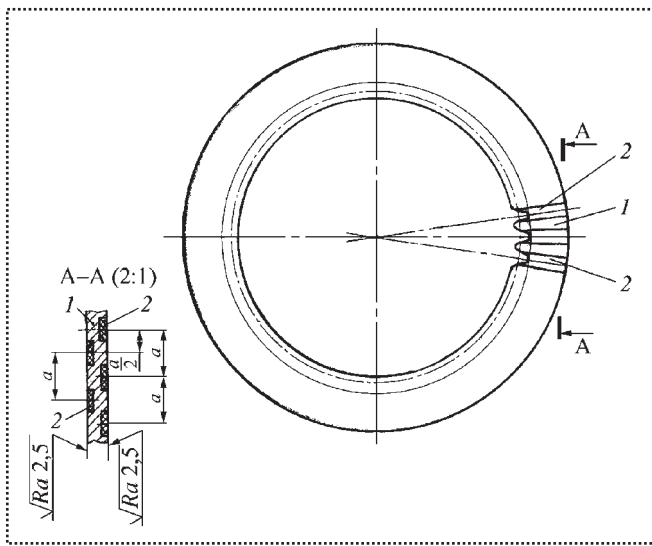


Рис. 1. Конструкция диска с комбинированной поверхностью трения:

a – шаг между канавками основы, заполненными материалом покрытия

боты узла с высоким коэффициентом трения при работе в масле.

Характеристика исходного сырья и материалов для изготовления покрытия диска

Аргон газообразный чистый марки "А" по ГОСТ 10157–79.

Азот газообразный чистый по ГОСТ 9293–74.

Порошок бронзовый фракции 50...80 мкм, полученный распылением из бронзы БрАЖ 9-4 ТУ 48-21-642–79.

Проволока молибденовая диаметром 1,4...1,8 мм марки МЧ МРН по ТУ 48-19-203–85.

Порошок карбида кремния по ГОСТ 26327–84 фракции 12...6 мкм.

Дробь техническая колотая из чугуна или стали марок ДЧК, ДСК фракции 0,5...1 мкм по ГОСТ 11964–81.

Вода для охлаждения под давлением 0,4...0,7 МПа.

Сжатый воздух под давлением 0,5...0,7 МПа, допустимые классы загрязнения 3, 5, 7, 9 по ГОСТ 17433–80.

Нефрас С3 80/120.

Технологический процесс изготовления заготовок дисков включает в себя следующие операции:

■ Подготовка поверхности диска к нанесению покрытия.

В вытяжном шкафу обезжиривают диск путем погружения его на 0,5...1 мин в ванну с нефрасом. Затем извлекают из ванны и сушат. Просушенные диски выгружают из вытяжного шкафа и укладывают на стеллаж.

■ Дробеструйная обработка поверхностей диска.

Проверяют чистоту и влажность сжатого воздуха.

Лист фильтрованной бумаги устанавливают напротив дробеструйного пистолета, перекрывают подачу дроби и открывают вентиль подачи воздуха. Если в течение 15 мин бумага будет чистой, тогда можно приступать к дробеструйной обработке поверхностей, на которые будут наносить покрытие. Когда же на фильтрованной бумаге будут наблюдаться масляные или водные пятна, необходимо провести наладку системы очистки и сушки сжатого воздуха, а затем приступить к дробеструйной обработке.

Диск устанавливают в дробеструйной камере и закрепляют. Включают вытяжную вентиляцию, открывают вентиль подачи сжатого воздуха (давление должно быть 0,55...0,65 МПа) и тягами управления плавно перемещают дробеструйный пистолет относительно обрабатываемой поверхности. Дробеструйная обработка поверхности будет окончена, когда исчезнут блестящие участки и поверхность приобретет серебристо-матовый оттенок.

■ Нанесение покрытия.

При нанесении подслоя молибденовую проволоку обезжиривают (промывают в нефрасе), высушивают под вытяжкой и наматывают на катушку подающего редуктора. Для нанесения покрытия на основе бронзы готовят механическую смесь из порошка бронзы марки БрАЖ 9-4 и порошка карбида кремния. Для этого в стакан смесителя загружают порошки бронзы и карбида кремния в соотношении 25:1 по массе, устанавливают стакан в смеситель, включают смеситель и смешивают в течение двух часов, выключают смеситель и снимают стакан с механической смесью порошков.

Перед нанесением покрытия на основе бронзы механическую смесь порошков бронзы и карбида кремния, насыпанную на металлический противень слоем 15...20 мм, просушивают в сушильном

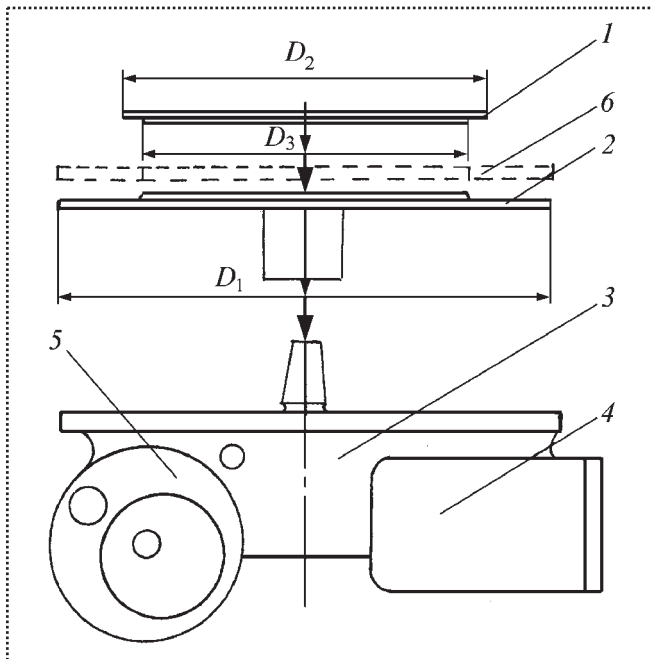


Рис. 2. Устройство для напыления дисков:

1 – крышка; 2 – основание; 3 – редуктор; 4 – электродвигатель для обеспечения поворота диска при напылении фрикционного материала; 5 – ручной привод; 6 – фрикционный диск; D_1 , D_2 , D_3 – размеры устройства для напыления; стрелками показаны связи узлов и деталей в устройстве

шкафу при температуре 110...120 °С в течение одного часа, периодически ее перемешивая металлическим шпателем. Затем ее охлаждают и загружают в дозатор плазменной установки. Устанавливают диск в камере напыления и закрепляют его в устройстве для напыления (рис. 2).

В табл. 1 приведены размеры устройства для напыления дисков двух типоразмеров. Диск $\varnothing 176$ мм для тормоза-синхронизатора, диск $\varnothing 216$ мм для фрикционов переключения передач в гидромеханической трансмиссии гусеничной машины.

Плазменную установку УПУ-3 готовят к работе согласно инструкции по эксплуатации и устанавливают дистанцию напыления 90...100 мм.

1. Размеры устройства для напыления дисков, мм

Диаметр диска	D_1	D_2	D_3
216	215±0,1	168±0,1	158±0,2
176	175±0,1	133±0,1	125±0,2

Включают вытяжную вентиляцию, плазменную установку, регулируют режим работы:

- ♦ напряжение 30...35 В;
- ♦ сила тока 520...540 А;
- ♦ расход плазмообразующего газа (аргон) 30...35 л/мм;
- ♦ давление плазмообразующего газа 0,35...0,40 МПа;
- ♦ скорость подачи молибденовой проволоки 20...25 единиц по нониусу.

Затем проверяют качество распыляемого металла. Для этого полосу листовой стали длиной 300±5 мм, шириной 50±3 мм и толщиной 2±1 мм обезжиривают в нефрасе, проводят дробеструйную обработку ее поверхности, вводят в струю распыляемого металла на расстоянии 90...100 мм от среза сопла и производят напыление в течение 5...10 с, выключают установку и проверяют качество напыления. Напыленный слой должен иметь частицы формы расплюснутой капли.

Включают устройство для напыления дисков, обеспечивая скорость вращения диска 38...62 рад/с (6...10 об/мин). Подводят плазмотрон к диску, включают плазменную установку, включают подачу молибденовой проволоки на распыление и совмещают пятно напыления с напыляемой поверхностью диска. Напыление молибденового подслоя осуществляется за 5–6 оборотов диска.

Выключают плазменную установку, вытяжную вентиляцию и устройство для напыления дисков, снимают диск и измеряют толщину напыленного молибденового покрытия, которая должна быть равна 0,1±0,02 мм по всей поверхности напыления.

Повторно устанавливают диск с напыленным подслоем из молибдена в камере напыления и закрепляют его в устройстве для напыления дисков, устанавливают дистанцию напыления 110...120 мм. Включают вытяжную вентиляцию, плазменную установку, регулируют режим работы:

- напряжение 30...35 В;
- сила тока 490...500 А;
- расход плазмообразующего газа (аргон) 30...35 л/мин;
- давление плазмообразующего газа 0,35...0,40 МПа;
- расход газа на подачу порошка 4...5 л/мин.

Качество распыла порошковой смеси проверяют путем напыления на обезжиренную и дробеструйную стальную полосу длиной 300±5 мм, шириной 50±3 мм, толщиной 2±1 мм. Выключают ус-



тановку и визуально оценивают качество покрытия, которое должно состоять из распыленных частиц, имеющих форму расплюснутой капли.

Включают устройство для напыления дисков, подводят плазмодотрон к вращающемуся диску, включают установку и производят напыление порошковой смеси.

Выключают плазменную установку, устройство для напыления дисков, вытяжную вентиляцию, замеряют толщину напыленного покрытия, которая должна быть равна $0,7 \pm 0,1$ мм по всей поверхности диска. Если требуемый размер не получен, то необходимо произвести повторное напыление.

В дальнейшем при напылении используют скорректированное время напыления. Диск снимают с устройства и укладывают в стеллаж длиной 1300 мм, шириной 700 мм и высотой 750 мм.

Механическая обработка покрытия

Шлифование дисков (см. рис. 1) проводят на плоскошлифовальном станке.

Режимы шлифования:

- скорость резания 30...35 м/с;
- глубина резания 0,08...0,1 мм;
- поперечная подача 0,9...1,1 мм/проход.

Охлаждающая жидкость — эмульсия.

Контроль качества покрытия

После шлифования покрытие диска не должно иметь сколов, трещин, раковин, шероховатость поверхности и размеры должны соответствовать чертежу.

В табл. 2 приведены расчетные нормы расхода сырья, мате-

2. Расчетные нормы расхода сырья, материалов и энергоресурсов

Наименование сырья, материалов, вида электроэнергии	Расход на диск диаметром, мм	
	176	216
Аргон газообразный, м ³	0,480	0,600
Проволока молибденовая, кг	0,033	0,045
Порошок бронзовый, кг	0,229	0,312
Порошок карбида кремния, кг	0,009	0,012
Дробь техническая, кг	0,020	0,030
Технологическая вода, м ³	0,040	0,500
Сжатый воздух, м ³	20,00	28,00
Нефрас, кг	0,010	0,012
Производительность напыления, кг/ч:		
по молибдену	1,1	
по бронзе	1,4	
КПД использования молибдена	0,8	
КПД использования бронзы	0,6	
Потребляемая мощность, кВт	27,5	
Расход электроэнергии, МДж (кВт/ч)	27 (7,33)	33 (9,17)

риалов и энергоресурсов для изготовления заготовок дисков трения.

В табл. 3 приведены температура и продолжительность операции изготовления заготовок дисков трения.

3. Температура и продолжительность операции, мин, изготовления дисков трения

Операция	Диаметр диска, мм		Температура, °С
	176	216	
Обезжиривание диска и его сушка	5		25±10
Установка диска в дробеструйную камеру	1		
Дробеструйная обработка	4	6	
Выгрузка диска из дробеструйной камеры	1		
Установка диска в камеру напыления	2		
Нанесение покрытия методом плазменного напыления	16	20	10000
Выгрузка диска из камеры напыления	2		25±10
Шлифование диска	10	12	
Примечание. Погружать на 0,1...0,5 мин в нефрас.			



Сборка дисков с комбинированной поверхностью трения

Металлокерамические (порошковые) фрикционные изделия состоят из стальной несущей основы, к которой с одной или двух сторон крепят фрикционные накладки. Существует несколько способов соединения порошковых накладок со стабильной основой. Наиболее распространенный из них включает раздельное прессование фрикционного слоя с последующим припеканием его к основе под давлением в печи с защитной атмосферой.

Технология изготовления фрикционных деталей из металлокерамических материалов включает следующие основные операции:

- подготовка шихты, т.е. просев и смешивание порошков в специальных смесительных агрегатах;
- подготовка стальных несущих подложек: основ (дисков, сегментов и т.д.);
- прессование фрикционных накладок;
- установка фрикционных накладок на подложки;
- спекание накладок и припекание их к стальным подложкам;
- охлаждение деталей после спекания.

Серийные металлокерамические диски для работы в масле и всухую изготавливают в основном методом прессования и спекания под давлением. При этом традиционным способом изготовления фрикционных порошковых материалов прочное соединение фрикционной накладки со стальным диском или каркасом обеспечивают за счет диффузионных процессов при спекании.

К недостаткам такого процесса сборки следует отнести:

- невозможность прессования тонких фрикционных накладок, что приводит к увеличению их толщины, а это связано с увеличением объема механической обработки (если ее проводят);
- трудоемкость и низкая производительность ручной операции при сборке пакета (фрикционной накладки и основы) для спекания;
- невозможность механизации процесса сборки пакетов вследствие низкой прочности спрессованных накладок;
- сложность предотвращения брака в результате смещения накладки на несущей основе при сборке и спекании пакета;
- нестабильность припекания;
- длительность спекания под давлением;

■ необходимость использования мощного прессового и специального термического оборудования со стабильными высокотемпературными характеристиками.

Целесообразно заготовку под спекание иметь в виде фрикционного слоя, предварительно соединенного с металлической основой, а прессование проводить непосредственно на основу.

Для достижения высоких эксплуатационных свойств деталей трения нанесение покрытий является наиболее целесообразным с экономической и технической точек зрения. Одним из наиболее перспективных методов формирования покрытий является метод плазменного напыления, который позволяет получить различные по составу газотермические покрытия, прочно связанные с металлической основой.

Высокоэнергетическое газотермическое напыление позволяет преодолеть ряд недостатков традиционных металлокерамических фрикционных и конструкционных материалов и находит широкое применение в машиностроении. Этот способ позволяет объединить процессы формирования и спекания конгломерированных частиц на напыленных поверхностях.

Привлекает внимание кратковременность, экономичность процесса плазменного напыления фрикционного слоя на поверхность основы, небольшой разогрев детали: 150...200 °С, стабильность процесса напыления прутковых материалов, что обеспечивает высокое качество напыления. Напыленный материал хорошо обрабатывается механически. Процесс нанесения плазменного напыления легко механизуется и автоматизируется. На поворотном столе можно установить несколько дисков под напыление покрытия.

Существенная технологическая задача при этом заключается в получении фрикционного покрытия заданного состава, в определении оптимальных параметров плазменного напыления, в оснащении участка для плазменного напыления покрытий и включает операции по оборудованию для подготовки поверхности над напыление, разработке и изготовлению оснастки, а также по организации рабочей зоны плазменного напыления. Завершающей стадией технологического процесса могут служить работы по контролю качества и дефектности



покрытий с акцентом на способы их предотвращения и устранения.

Вывод

Использование фрикционных дисков с комбинированной поверхностью трения, имеющих повышенный коэффициент трения при работе по стальному контртелу в масле в сравнении с серийными металло-

керамическими дисками, упрощает сборку фрикционных устройств за счет меньшего количества дисков трения в узле.

Библиографический список

1. Проблемы трения и смазки. М.: Мир. 1988. № 1.
2. Федорченко И.М. и др. Порошковая металлургия. Материалы, технологии, свойства, области применения. Справочник, Киев: Наукова думка, 1985. 623 с.

Н.С. Григорьева, канд. техн. наук (Луцкий национальный технический университет)

Гибкие модульные сборочные технологии

Статья посвящена развитию научных основ автоматизации модульных процессов гибкого сборочного производства на базе современных модульных технологий и высокоэффективного переналаживаемого модульного оборудования и оснащения. Создана комплексная модель процесса гибкой автоматической модульной сборки как совокупности всех видов связей, действующих при переналадке технологии и конструкции оборудования и оснащения.

The article deals with the development of scientific foundations for automatically module technologies of the flexible automatic assembling production. A complex model of process of flexible automatic module assembling has been created, which makes it possible to reveal the regularities of its passage as a set of all kinds of connections. The flexibility in such systems is provided at construction, technological, algorithmic levels being estimated by the adjustment coefficient.

Ключевые слова: сборочные технологии, автоматизация, модульная сборка.

Key words: assembling technologies, automation, module assembly.

Анализ тенденций развития автоматизации технологических процессов в сборочном производстве показывает, что на современном этапе в условиях рыночной экономики наиболее подходящей является гибкая автоматическая модульная сборка разнотипных изделий.

Такая сборка наиболее полно отвечает быстро-му изменению их номенклатуры, повышению ка-

честв и конкурентоспособности, в которой используют гибкую безлюдную модульную технологию и переналаживаемое модульное сборочное оборудование с оснасткой.

Специфика современных автоматических технологических сборочных процессов характеризуется:

- особенностями автоматизации;
- незначительной стандартизацией;
- недостаточными теоретическими и практическими наработками выполнения отдельных элементов операций.

Это приводит к низким автоматической собираемости деталей изделий, технико-экономическим показателям и узким технологическим возможностям.

Если основой комплексной автоматизации в крупносерийном или массовом производстве были хорошо отработанные автоматические линии и их технологическая оснастка, то в современном серийном производстве такой основой являются гибкие сборочные системы разного уровня интеграции и автоматизации.

Причины отсутствия дальнейшего развития гибких сборочных производств кроются не в их потенциальных недостатках, а в неправильном подходе к их созданию, неприменении новых концепций, в частности модульности, нерешенности ряда проблем.

Все это существенно тормозит широкое внедрение гибких сборочных производств, несмотря на ряд потенциальных преимуществ.

Одним из направлений последующего развития гибкого сборочного производства, которое обеспечивает существенное повышение эффективности,



является использование технологических модульных сборочных процессов и модульного переналаживаемого сборочного оборудования с оснасткой. Такие работы известны [1], но они в основном относятся к механической обработке деталей изделий.

Подтверждение упомянутого можно найти в концепции развития будущего компьютерно-интегрированного производства *CIM*, элементом которого фактически и является гибкое модульное сборочное производство. *Повысить эффективность гибкой модульной сборки изделий* можно за счет:

- ◆ применения автоматического проектирования изделий с использованием модульных конструкций;
- ◆ повышения показателей качества;
- ◆ снижения производственных расходов и отпускных цен при соблюдении экологических, энергетических и других требований.

Достигают это широким внедрением интегрированных модульных технологий, современного технологического оборудования и оснастки новой генерации с применением элементов искусственного интеллекта, систем организации и управления процессами, которые базируются на концепциях маркетинга, логистики и инноваций. *Проблемы гибкой модульной сборки* лежат в разных плоскостях, но в первую очередь конструкционной, технологической, организационной и алгоритмической при условии повышения качества и конкурентоспособности изделий и закладке в их основу положений: проще, лучше, дешевле.

Принципы модульности технологий и конструкций при гибкой автоматической сборке изделий обеспечивают наибольший дополнительный технико-экономический эффект за счет формирования гибких технологических процессов из взаимосвязанных технологических модулей, а переналаживаемого сборочного оборудования и оснастки – из конструкционных модулей.

Технологические и конструкционные модули имеют ограниченную номенклатуру, что дает возможность (при системном подходе и стандартизации) создания единой элементной базы на модульном уровне для всего гибкого сборочного производства. Такое построение технологического обеспечения:

- значительно расширяет его возможности;
- увеличивает эффективность гибкой модульной сборки;

- повышает качество собираемых изделий;
- уменьшает расходы и существенно сокращает техническую подготовку производства, что кардинально изменяет сущность гибкой сборки.

Анализ современных конструкторско-технологических решений гибкой автоматической сборки изделий позволяет сделать следующие выводы:

- известные теоретические наработки отдельных вопросов гибкой автоматической сборки, достаточно общие и фрагментные, сводятся к анализу реализующих конструкций, принципов действия и носят описательный характер;
- практически отсутствуют теоретические наработки вопросов переналадки, которые были заимствованы и механически перенесены еще из серийного производства, когда гибкая автоматизированная сборка лишь только зарождалась, а потому описанные решения требуют анализа, систематизации, обобщения и унификации;
- известны фактически начала основ автоматизации модульных технологических процессов, и то в основном для механической обработки деталей, теоретические же наработки по модульным процессам автоматической сборки полностью отсутствуют, а единичные описания таких процессов весьма общие, фрагментные и могут рассматриваться лишь как начальные;
- применение модульного принципа при разработке гибких автоматических сборочных технологий, изделий, переналаживаемых конструкций технологического оборудования, оснастки явно недостаточно и требует значительной проработки.

Предпосылки формирования гибких модульных сборочных систем вытекают из современных тенденций развития производства. Однако главными подходами являются разработка и использование элементов:

- высокоэффективных сборочных технологий типа *CALS-technologies*;
- модульности технологий и конструкций;
- переналаживаемости;
- адаптивности;
- интеллектуальности управления;
- качества и конкурентоспособности автоматически собираемых изделий;
- унифицированности конструктивно-технологических решений.

При этом предусматривают использование достижений различных отраслей науки, таких как теории множеств, матриц, графов, логики, вероятно-



сти, электроники, программного управления, механизмов и машин и тому подобное. Большое значение имеет общая теория точности, особенно автоматической сборки, надежности и производительности.

При построении гибких модульных сборочных систем следует руководствоваться новой технической политикой, суть которой заключается в следующем:

- не должны автоматизироваться лишь ручные движения сборщика или оператора;
- применение комплексного подхода с просмотром всей сборочной цепочки и принципа необходимости, т. е. применение в первую очередь средств автоматизации узких мест;
- повышение показателей качества и уровня конкурентоспособности;
- недопустимость распространения недостаточно проработанных малонадежных технических решений.

Для кардинального решения задач гибких модульных сборочных систем необходимо широкое использование модульного принципа и системного подхода в первую очередь на уровне модульной технологии, переналаживаемого оборудования с оснасткой, а также собираемых изделий. Такая реализация потребует:

- ◆ разработки методов замены объекта сборочного производства множеством модулей;
- ◆ применения общих принципов построения из модулей изделий и средств технологического обеспечения;
- ◆ унификации модулей;
- ◆ достижения эффективности модульного построения изделий и средств их технического обеспечения.

Таким образом, основными принципами построения гибких модульных автоматизированных сборочных систем можно считать:

- системность;
- модульность;
- переналаживаемость;
- концентрацию;
- моделирование процессов;
- многокритериальность технолого-конструкционных решений;
- информационную обеспеченность;
- повышение качества и конкурентоспособности автоматически собираемых изделий.

Это позволяет значительно сократить сроки разработки гибких модульных сборочных процессов и проектирования переналаживаемого модульного сборочного оборудования и оснастки за счет возможности быстрой компоновки их из отдельных технологических и конструктивных модулей, повышения показателей качества и уровня конкурентоспособности, уменьшения всех видов затрат.

Отдельно следует выделить *применение принципа модульности для гибкой автоматической сборки*, под которым понимают построение технологических сборочных процессов и систем путем их компоновки из взаимосвязанных модулей ограниченной номенклатуры. **Модуль** является хорошо отработанной оптимизированной сборочной единицей многократного использования с характерными чертами:

- автономности;
- стыкуемости;
- связанности;
- гибкости;
- избыточности.

Под **технологическим модулем** понимают комплекс элементарных сборочных движений, которые выполняются в заданной последовательности и имеют законченный объем, а **конструкционный модуль** — это его функциональная конструкционная реализация.

Технологические модули формируют на основании конструкции сборочных соединений изделия (лучше модульного). Они тесно связаны с конструктивными модулями переналаживаемого сборочного оборудования и оснастки. Технологические модули представляют собой элементарную технологическую единицу с определенным объемом сборочных движений, вытекающих из его гибкости и особенностей модульной автоматической сборки. Модули могут образовывать комплекты и комплексы, в зависимости от степени объединения выполняемых сборочных функций. В общем, технологический модуль можно описать матрицей [2]

$$TM_i = \begin{vmatrix} d_{o11} & d_{o12} & \dots & d_{o1a} \\ d_{b21} & d_{b22} & \dots & d_{b2a} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{bb1} & d_{bb2} & \dots & d_{bba} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где d_{oi} , d_{vj} – соответственно основные и вспомогательные сборочные движения;

a , b – их количество.

Технологический модульный сборочный процесс может быть записан некоторой совокупностью стыкуемых модулей:

$$\text{ТМП}_i = \bigwedge_{i=1}^a \text{МТК}_i \left[\bigwedge_{j=1}^b \text{МК}_i \left(\bigwedge_{k=1}^c \text{ТМ}_k \right) \right]_{\text{опт}}, \quad (2)$$

где ТМП_i – i -й технологический модульный сборочный процесс;

a , b , c – оптимальное количество модульных технологических комплексов (МТК), комплектов (МК), технологических модулей (ТМ).

В таком модульном сборочном автоматическом процессе каждый технологический модуль связан с предыдущим и последующим, а также модулями управления конструкционными техническими параметрами. Поскольку в основе технологических и конструкционных модулей лежат сборочные движения, то определение закономерности их формирования нуждается в моделировании таких модульных сборочных процессов.

Оптимизационная модель гибкой модульной автоматической сборки разнотипных изделий отличается от других:

- модульным принципом ее построения;
- корректностью математического описания;
- широкой универсальностью;
- оптимизационной сущностью;
- особенностями и отличиями процессов совмещений при модульной сборке;
- возможностью достыковки новых модулей;
- программируемостью.

Модель гибкой автоматической сборки состоит из отдельных состыкованных модулей:

- ◆ определения занимаемого положения деталей;
- ◆ формирования оптимальных траекторий их перемещения во время модульной сборки;
- ◆ построения функции цели, ее градиента;
- ◆ выбора метода минимизации функции цели;
- ◆ ограничения формы собираемых деталей и элементов технологического оборудования и оснастки;
- ◆ программной реализации модульного сборочного процесса.

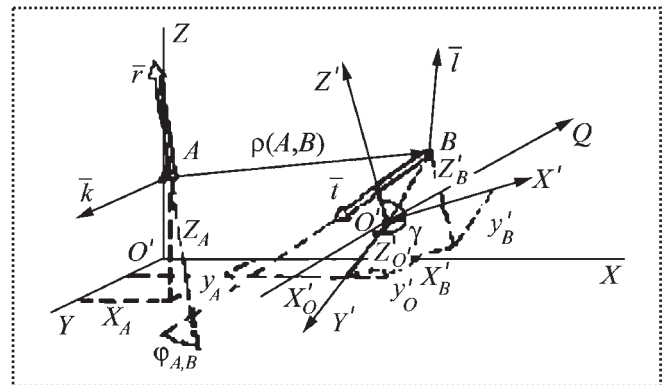


Рис. 1. Векторная интерпретация пространственного положения деталей при модульной сборке:

$X'Y'Z'$ – подвижная система координат; A – точка неподвижных базовых деталей; B – точка подвижных деталей

Процесс гибкой модульной сборки базовых и присоединяемых различных деталей изделий рассматривают как совмещение в пространстве двух пар векторов, которые определяют их положение: одного – осевого (\bar{r} , \bar{l}) и второго – углового (\bar{k} , \bar{i}). Построенная из позиций системного анализа программа оптимизации на модели отображает пространственно-временные связи и раскрывает сущность всех элементов гибкой модульной сборки.

Положения базовых и присоединяемых деталей (рис. 1) определяют координатами и тремя числами, пропорциональными направляющим косинусам в неподвижной системе координат

$$\begin{aligned} T_{1A} &= \cos \alpha_{X_A} = a_{X_A} / T_A; & T_{2A} &= \cos \alpha_{Y_A} = a_{Y_A} / T_A; \\ T_{3A} &= \cos \alpha_{Z_A} = a_{Z_A} / T_A; & T_A &= \sqrt{a_{X_A}^2 + a_{Y_A}^2 + a_{Z_A}^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где X_A , Y_A , Z_A – координаты вектора;

a_{X_A} , a_{Y_A} , a_{Z_A} – числа, которые полностью определяют положение детали в принятой системе.

Подобно определяют перемещаемые собираемые детали в подвижной системе координат $X''Y''Z''$ со своими координатами центра сопряжения деталей X'_B, Y'_B, Z'_B и тремя числами $a_{X'_B}, a_{Y'_B}, a_{Z'_B}$. Текущее расстояние между заданными точками составляет $\rho(A, B)$.

Процесс гибкой модульной сборки в общем заключается в том, что точка B деталей, которые перемещаются в сборочном пространстве, должна



быть совмещена с точкой A неподвижных базовых деталей. Направления векторов, на которых лежат указанные точки, должны быть противоположными.

Сборочная траектория подвижной детали будет определяться движением начала координат системы $X'Y'Z'$, т.е. точки O' . Потому перемещение точки B собираемой детали учитывается как изменение положения точки O' . Для однозначной связи ориентации точки O' с осями подвижной системы $X'Y'Z'$ предполагается, что углы между прямой $O'n$ и осями равны углу γ , а $\cos\gamma = 0,577$.

Функцию цели представляют в нормируемом виде по отношению к метрике пространства, в котором определяют расстояние между собираемыми разнотипными деталями. В этом случае в качестве оптимальной функции цели целесообразно использовать распространенное квадратичное выражение от метрики пространства – расстояние между элементами и углами отрезков, которые соединяют эти элементы.

Если считать элементами пространства функции цели, которые определяют сборочное перемещение деталей по отношению к базовым, то в общем случае это будет отвечать пространству $\int_a^b |x(t)|^p dt$, которое существует в смысле Лебега ($p = 1, 2, \dots$), а функция цели определяется как

$$K = \frac{1}{2} \left\{ \left| \frac{\left(\int_a^b |x_A(t) - x_B(t)|^p dx \right)^{1/p}}{x_A(t_0) - x_B(t_0)} \right|^2 + (1 + \cos(A, B))^2 \right\}, \quad (4)$$

где расстояние между координатами векторов определяется метрикой пространства

$$\rho(A, B) = \left[\int_a^b |X_A(t) - X_B(t)|^p dx \right]^{1/p};$$

угол между этими векторами описывается $\cos(A, B)$;

t_0 – начальный момент времени;

t – текущий момент времени.

Запрещенные пространства могут быть заданы размерами геометрических фигур, например, шара, т.е. на функцию цели налагается ограничение

$$\rho(A, B) \geq R + r,$$

где R, r – радиусы шаров запрещенных пространств.

Поскольку расстояние между точками определяется как функция времени изменения координат, то имея дифференциальные уравнения движения, можно оптимизировать функцию цели и в динамическом процессе. На основании проведенных теоретических исследований получены аналитические зависимости оптимизационной модели гибкой модульной сборки разнотипных деталей, которые позволили сформулировать принципиальные положения, подходы, связи и закономерности для разработки гибких модульных технологий и переналаживаемого модульного сборочного оборудования с оснасткой.

Для модульных сборочных систем (объекта с определенными взаимосвязями и совокупностью необходимых функций и реализующих целевых модулей) и их взаимодействия разработана классификация с учетом выбранных критериев. Классификация имеет возможность расширения по новым критериям и углубления за счет ее детализации. Она описана с помощью матриц и может быть запрограммированной.

На основании установленных взаимосвязей гибкой модульной автоматической сборки получены типовые схемы структур гибких модульных сборочных систем, которые могут быть представлены комплексным орграфом. Выявленные закономерности развития структур дают возможность осуществлять целенаправленный переход от нужных требований, предъявляемых собираемым деталям к оптимальной структуре гибких модульных сборочных систем, модульных технологий, компоновок переналаживаемого модульного сборочного оборудования и оснастки.

Основными элементами модульной сборочной технологии (рис. 2) являются технологические и конструкционные модули, которые математически

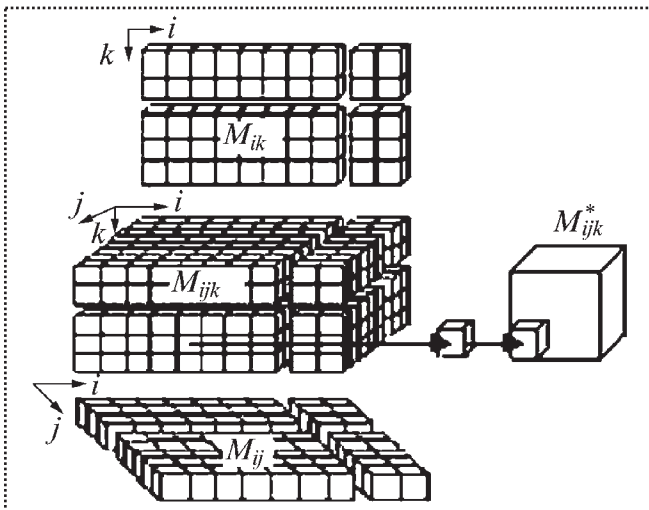


Рис. 2. Схема формирования объемной матрицы параметров сборочных модулей

записываются объемной матрицей, скомпонованной из обычных составляющих матриц (на рис. 2 составляющие матрицы показаны прямоугольниками). Объемная матрица M_{ijk} описывает общую классификацию сборочных модулей по выбранным критериям в трех направлениях.

Передняя вертикальная матрица M_{jk} описывает разновидности модулей по типу сборочного соединения (направление j) и форме соединяемых поверхностей (k). Любой элемент этой матрицы, например, соединение с цилиндрическими поверхностями, уточняется по двум другим критериям, размерам и точности, образуя верхнюю горизонтальную матрицу M_{ij} . А ее элемент является началом боковой вертикальной матрицы M_{ik} , которая конкретизирует способ сборки и производительность. Таким образом, каждый элемент объемной матрицы может быть сколь угодно расширенным.

Объемная матрица записывается как

$$M_{ijk} = M_{ij} \cap M_{ik} \cap M_{jk},$$

где M_{ij} , M_{ik} , M_{jk} – составляющие объемной матрицы; \cap – логическое произведение "и". В зависимости от глубины конкретизации можно в дальнейшем оперировать множествами, достигая конкретных оптимальных решений.

В начале модули следует классифицировать по функциональным элементам сборочной операции. Это модули:

- загрузки;
- подачи;
- базирования;
- установки;
- пространственного и взаимного ориентирования;
- сопряжения;
- фиксации;
- снятия собранных изделий;
- транспортировки;
- контроля;
- диагностирования;
- управления.

Определены конструкторские и технологические факторы, обуславливающие структуру сборочных модулей:

- рабочие и базовые поверхности;
- характер соединения;
- точность сборки, закрепления, базирования;
- сборочные движения и тому подобное.

С использованием разработанного подхода методика описания технологического модуля сборочного узла (рис. 3) предусматривает использование матрицы соединяемых поверхностей деталей M_{1k} , которая описывает сопряжение поверхностей, разновидность соединения и предъявляемые к нему требования.

Уточняя соединение поверхностей, следующая матрица макрогеометрии сборочного соединения M_{2k} конкретизирует вид функциональных переме-

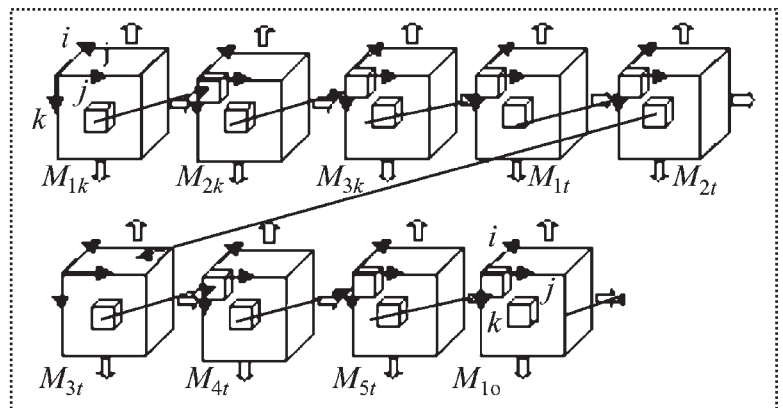


Рис. 3. Схема описания технологического модуля сборочного узла



щений, размеры и жесткость собранного узла. Матрица точности M_{3k} раскрывает метод достижения точности соединения, отклонения формы и взаимных перемещений.

На этом описание конструкторских параметров заканчивается, хотя при необходимости может быть продолжено. Технологические параметры описывают матрицы:

- структур M_{1r} (производительность, способ сборки, структура процесса);
- сборочных движений M_{2r} (основные, вспомогательные, разновидности);
- базирования M_{3r} (способ базирования, технологические базы, число одновременно собираемых деталей);
- ориентирования M_{4r} (пространственное, взаимное, способ ориентирования);
- сопряжения M_{5r} (характер сопряжения, фиксации, контроля);
- сборочной оснастки M_{6r} (оборудование, инструмент, приспособление);
- режимов сборки M_{7r} (сила, способ приложения, подача).

Матрица организации сборки M_{10} имеет те же три направления расширения, что и в предыдущих случаях:

- ◆ организационную форму сборки;
- ◆ межоперационные перемещения;
- ◆ транспортное оборудование.

Предложено подобное описание собираемых деталей изделий.

С учетом взаимосвязей и закономерностей между сборочными переходами на основе теории структур предложен новый подход к формированию типовых структур модулей и гибких технологических процессов модульной сборки изделий, которые оценивают оперативным временем и производительностью. В зависимости от степени совмещения основных и вспомогательных переходов получено по три класса и группы с подгруппами вспомогательных модульных процессов.

Сформированы 51 типовая структура модулей и технологических модульных процессов. Выбор конкурирующих вариантов структуры проводят вычислением ее производительности и последующим сравнением с требуемой с дальнейшей оптимизацией.

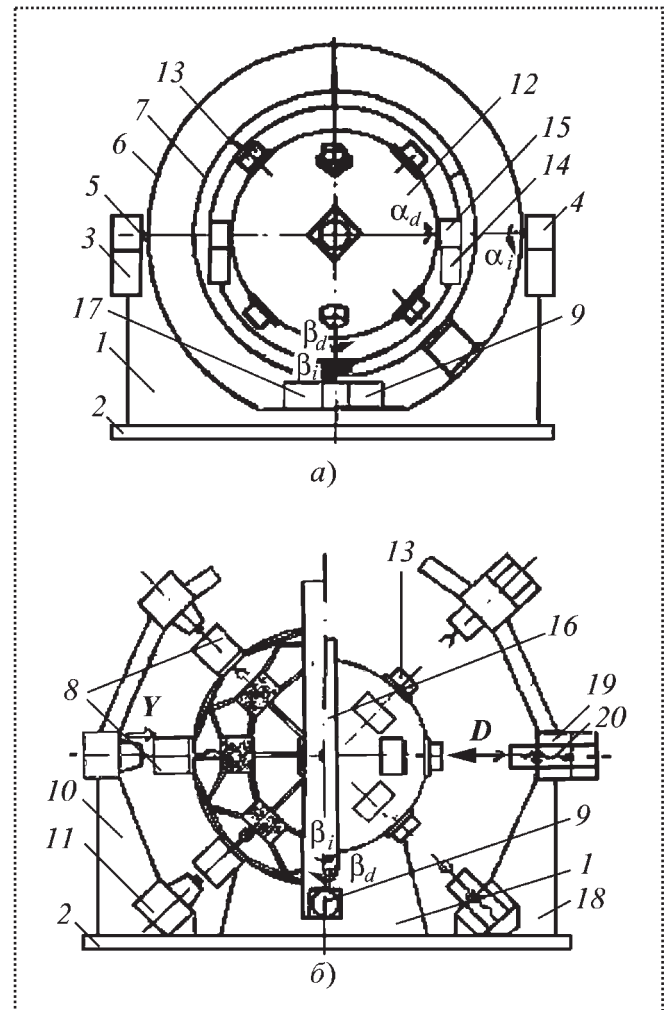


Рис. 4. Кинематическая схема сферического модульного сборочного центра:

a – вид спереди; *б* – вид сбоку

Выявлено также три класса, три группы структур и шесть подгрупп, которые образуют 18 типовых структур переналадки. Далее варианты структур модулей или модульных сборочных процессов сравнивают по критериям технологической себестоимости, устанавливают рациональную, которую уточняют и оптимизируют.

Оптимизацию технологических модульных процессов гибкой сборки решают в многоцелевой постановке, сущность которой состоит в определении характеристики распределительной функции, стратегии и режимов управления с точки зрения минимизации принятого показателя эффективности. Более просто, но менее точно установить оптимальную структуру процесса гибкой модульной сборки можно с применением теории графов, отображая



орграф структур или других элементов гибкой сборки, который в общем случае описывают системой матричных уравнений. Решение находят с помощью известных алгоритмов и программ как определение минимального или максимального пути в таком графе.

С использованием полученных закономерностей, взаимосвязей и предложенной методики проектирования получен ряд конструкций переналаживаемого модульного сборочного оборудования и оснастки, которые отличаются от известных новизной и новым положительным эффектом.

Спроектирована оригинальная конструкция сферического модульного сборочного центра [3] (рис. 4), в котором на стойках 1 основания 2 установлены приводы точного 3 и быстрого 4 вращения. На их осях 5 смонтировано кольцо 6 вращения на угол α_i инструментальной сферы 7 с инструментальными позициями 8 сборочных модулей и инструмента.

Привод 9 обеспечивает второе вращение сферы 7 на угол β_i . Напротив инструментальных позиций 8 на неподвижной стойке 10 размещены накопители 11 сборочного инструмента, которые загружают в направлении стрелки I.

Такие же накопители 11 собираемых деталей имеют собственные накопители и модули разгрузки-загрузки. Внутренняя подвижная сфера 12, которая несет сборочные позиции 13 арочной сотовой конструкции, установлена на приводах точного 14 и ускоренного 15 вращения на угол α_d , которые смонтированы на подвижном кольце 16, установленном на верхнем и нижнем валах привода 17 вращения на угол β_d . На стойке 18 напротив мест возможного расположения позиций 13 установлены накопители 19 деталей, загружаемые в направлении стрелки D.

При работе центра сборочные позиции 13, размещенные на внутренней подвижной сфере 12, при вращении на углы α_d и β_d устанавливаются напротив накопителей деталей 19 и собираемые детали загружаются через межпозиционное пространство арочной конструкции сферы 7. Подобно выполняется загрузка инструментальных позиций 8.

После этого по команде программы управления сборочные позиции 13 подвижной сферы 12 по

очереди устанавливаются напротив требуемых инструментальных позиций 8, осуществляется их самоустановка и фиксация. На каждой позиции выполняется сборка согласно технологическому модульному процессу.

Сущность нового подхода в создании сборочных центров заключается в использовании ряда подвижных сфер с многими сборочными и инструментальными позициями, самоустановкой и саморазгрузкой конструкции. На этой основе был создан подобный модульный обрабатывающий центр [4].

Обеспечение качества и конкурентоспособности изделий в гибком модульном сборочном производстве достигается за счет проведения опережающей их оценки, которая проводится при проектировании на компьютере виртуальных конструкций, гибкой модульной сборочной технологии, ее "прокрутке" по эксплуатации [5]. Применение виртуализации позволило значительно повысить эти показатели, увеличить количество высокоэффективных конструктивно-технологических решений, отбросить непригодные, значительно уменьшив сопроводительные расходы и увеличив эффективность применения конкурентоспособных изделий.

Такая методика может быть рекомендована как обязательная перед окончательным принятием конструктивно-технологических решений. К преимуществам такой методики можно отнести возможность анализа и формирования конкурентоспособности на любом уровне. Поскольку модульная сборка является лишь частью изготовления изделий, можно ограничиться определением технологической себестоимости по известным зависимостям.

Вывод

Теоретическими подходами формирования научных основ автоматизации модульных технологий гибкого сборочного производства можно считать принципы технологии типа CALS. Гибкость модульной сборочной системы обеспечивается на конструктивном, технологическом и алгоритмическом уровнях с использованием матриц времени сборки и переналадки, которые подлежат анализу и синтезу.

Впервые предложен новый подход представления и описания модулей объемной матрицей их характеристик. Согласно принципам построения различных объектов из модулей, действующих закономерностей и



взаимосвязи, разработана методика построения технологических и конструкционных модулей, которые формируются параллельно.

Предложена методология разработки гибких технологических автоматизированных модульных процессов и переналаживаемого сборочного оборудования, оснастки.

Впервые разработана методика опережающей оценки конструктивно-технологических решений гибкого модульного сборочного производства, которая позволяет еще на предпроектной стадии выбрать лучшие варианты, подлежащие дальнейшей разработке, и исключить неперспективные.

Таким образом, для получения наибольшей эффективности при организации модульного автоматизированного сборочного производства необходимо полностью переходить на модульную основу, т.е. все конструкции изделий, технологической оснастки, гибкой технологии сборки, управления и организации должны быть модульными. Построение производ-

ственного процесса должно осуществляться по принципам гибкой модульной автоматизированной технологии. При частичном решении этих вопросов эффективность принципа модульности при гибкой автоматической сборке снижается.

Библиографический список

1. Базров Б.М. Модульная технология в машиностроении. М.: Машиностроение, 2001. 368 с.
2. Григор'єва Н.С., Божидарнік В.В., Шабайкович В.А. Автоматичне складання виробів. Вид-во "Надстир'я", м. Луцьк, 2005. 382 с.
3. Патент України № 55715 А, МКИ В25J9/08. Складальний центр / В.А. Шабайкович, Н.С. Григор'єва, В.І. Марчук, О.С. Поліщук. Заявл. 22.5.02; Опубл. 15.04.03. Бюл. № 4. 5 с.:іл.
4. Патент України № 63128 А, МКИ В25J9/08. Оброблювальний центр / В.А. Шабайкович, Н.С. Григор'єва, В.І. Марчук. Заявл. 09.12.02; Опубл. 15.01.04. Бюл. № 1. 5 с.:іл.
5. Grigorjeva N. Scientific Foundation of Module Technologies for Flexible Assembling Production. Magazine "Akta Mechanika Slovaca", Košice, ročník 12. 2–A/2008, P. 225–231.
6. Материалы международного научного симпозиума "Современные технологии сборки". Сборник. МГТУ "МАМИ". 2008.



ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОБЪЕМНЫХ ГИДРОПРИВОДОВ

(Библиотека конструктора)

М.Е. Гойдо

2009. – 304 с. ISBN: 978-5-94275-427-3

Цена 440 р. с НДС

Приведены классификация объемных гидроприводов; правила выполнения их схем; математическое описание процессов, происходящих при работе гидроприводов; типовые схемные решения, используемые при проектировании объемных гидроприводов; выбор параметров и исследование характеристики работы объемных гидроприводов различного назначения и исполнения при разных условиях нагружения; применение САПР при проектировании гидроприводов.

Для инженеров-конструкторов, изготовителей, а также обслуживающего персонала гидрооборудования, может быть полезна преподавателям и студентам вузов.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

Прогнозирование изменений показателей качества при изготовлении деталей наукоемких изделий

Рассмотрены вопросы прогнозирования изменения значений параметров качества для учета взаимодействия методов обработки резанием и термической обработки.

Problems of perfection factors changing prediction for combination of cutting and thermal processing communication have been considered.

Ключевые слова: показатели качества, наукоемкое изделие, обработка резанием, термическая обработка.

Key words: perfection factors, science manufacture, cutting, thermal processing.

Существующая и широко применяемая в производственной практике методология проектирования технологических процессов (ТП) изготовления машин и их элементов является эмпирической. Спроектированный ТП часто не гарантирует достижения заданных значений множества заданных показателей качества (ПК) предмета производства, разработчик ТП не имеет средств объективной оценки (прогнозирования) ожидаемых значений ПК предмета производства как на промежуточных этапах ТП изготовления, например детали, так и по его завершении.

Спроектированный ТП сохраняет высокую неопределенность в отношении достижения желаемых значений ПК предмета производства, его эффективная реализация невозможна без тщательной экспериментальной проверки, отладки и доводки в производственных условиях, что вызывает дополнительные производственные затраты, удлиняет производственно-технологический цикл и снижает конкурентоспособность изделия.

При изготовлении деталей в едином ТП присутствуют операции, базирующиеся на использовании технологических методов разной физической природы (обработки резанием, термической и химико-термической обработки, поверхностного пластического деформирования и т.д.). Применение

каждого метода вызывает как целевые, так и возможные (неконтролируемые) изменения значений ПК предмета производства. Последние могут дестабилизировать выполнение последующих технологических операций и в целом негативно влиять на выходное качество изделия.

Современному технологу не дается обоснованных рекомендаций по выбору оптимального места операций определенной физической природы в ТП изготовления деталей машин. Определение, например, места термической обработки в ТП изготовления детали остается нетривиальной задачей, между тем именно это в значительной мере определяет структуру ТП и эффективность его реализации. Отсутствует аппарат формального представления и описания реализации технологического метода, пригодный для использования при технологическом проектировании. Это делает малоэффективными существующие подходы к структурной оптимизации ТП. Незаработанность способов количественного прогнозирования ожидаемых значений ПК деталей в ТП, взаимодействующие методы разной физической природы сокращают возможности корректной технологической формализации, являющейся необходимым условием создания полноценных и эффективных систем автоматизированного проектирования ТП.

В работах А.М. Дальского, П.И. Ящерицына показано влияние структуры ТП на итоговое качество элемента машины, раскрывающееся через механизм технологического наследования. Впервые был поставлен вопрос об оптимизации сочетаний видов обработки при обеспечении качества изделия. Вместе с тем традиционный аппарат теории технологического наследования обладает ограниченными возможностями для прогнозирования свойств изделий даже при известных связях, возникающих в ТП.

Качество изделия при его изготовлении, являясь следствием воздействия на предмет производства технологических методов разной физической природы, формируется в результате параллельной



реализации процессов изменения и сохранения значений его показателей. Разработан математический аппарат описания трансформации значений ПК обрабатываемых резанием заготовок в ТП изготовления деталей, учитывающий как целевые технологические воздействия, так и наследование свойств. Критически переосмыслены некоторые фундаментальные положения теории технологического наследования, в частности, показано, что операции термической обработки ("технологические барьеры") увеличивают неопределенность свойств предмета производства и изменяют некоторые из них в нежелательных направлениях.

Обеспечение качества изготовления деталей наукоемких изделий машиностроения связано с решением сложной, актуальной научной задачи прогнозирования взаимодействий технологических методов разной физической природы в процессах изготовления деталей. Эта задача всегда была актуальной для технологии машиностроения, однако в настоящее время ее актуальность существенно возросла. Последнее связано, прежде всего, с возрастанием доли наукоемких изделий на современном машиностроительном рынке и резким ростом требований к их качеству. Бурно развиваются методы экспресс-оценивания результатов реализации ТП с позиции не только производственно-технологических этапов, то и всего жизненного цикла изделия. На производстве применяют технологический аудит решений, эффективность которого также зависит от надежности и достоверности прогнозирования изменений ПК предмета производства. Выдающаяся роль в разработке методологии прогнозирования изменений ПК предмета производства, прежде всего напряженного состояния обрабатываемых заготовок, принадлежит научной школе РГАТА им. П.А. Соловьева и является результатом работ, выполненных при участии и под руководством В.Ф. Безъязычного.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработана и прошла апробацию модель реализации технологического метода, пригодная для использования при проектировании маршрутных ТП изготовления деталей и позволяющая количественно оценивать математические ожидания и дисперсии выходных значений ПК обрабатываемой заготовки. В предложении нормальности законов распределения входных и выходных значений параметра (ПК):

$$\begin{aligned} m(p^0) &= b_0 + \left[r(p^0, p^1) \frac{\sigma(p^0)}{\sigma(p^1)} \right] m(p^1); \\ D(p^0) &= D\left(\frac{p^0}{p^1}\right) + \left[r(p^0, p^1) \frac{\sigma(p^0)}{\sigma(p^1)} \right] D(p^1), \end{aligned} \quad (1)$$

где $m(p^1)$, $m(p^0)$ – математические ожидания входных и выходных значений параметра соответственно;

$\sigma(p^1)$, $\sigma(p^0)$ – среднеквадратичные отклонения соответственно входных и выходных значений параметра;

$D(p^1)$, $D(p^0)$ – дисперсии соответственно входных и выходных значений параметра;

$D\left(\frac{p^0}{p^1}\right)$ – условная дисперсия относительно линии регрессии $m(p^0/p^1)$;

$m(p^0/p^1)$ – коэффициент корреляции выходных и входных значений параметра;

b_0 – слагаемое, определяемое по методу наименьших квадратов. Величина

$$b_1 = r(p^0, p^1) \frac{\sigma(p^0)}{\sigma(p^1)} \quad (2)$$

может рассматриваться как передаточная функция (характеристика реализации конкретного технологического метода).

Исследовано и смоделировано (см. таблицу) изменение в результате технологических воздействий четырех ПК предмета производства, наиболее часто используемых при проектировании маршрутных ТП:

- отклонения размера поверхности Δp ;
- среднего арифметического отклонения профиля шероховатости Ra ;
- степени наклепа U_n ;
- твердости по Бринеллю HB .

Экспериментально определены характеристики изменений рассматриваемых ПК для реализации технологических методов разной физической природы. Относительные погрешности определения средних значений указанных ПК при использовании моделей не превышают 25...40 %, что вполне приемлемо для использования моделей при проектировании маршрутных ТП изготовления деталей.

Установлено:

1. Эффективное взаимодействие методов разной физической природы в едином процессе изго-

**Изменение параметров качества предмета производства**

Наименование ПК	Обозначение	Модель описания изменения
Отклонение размера допустимое	$[\Delta p]$	$[\Delta p]^0 = [\Delta p]^1 = \frac{f(I^0)}{f(I^1)}$
Среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости	Ra	$Ra = r_0 + \frac{\Delta(Ra^0)}{\Delta(Ra^1)} Ra^1$
Степень наклепа	U_n	$U_n = u_0 + \frac{\Delta(U_n^0)}{\Delta(U_n^1)} U_n^1$
Твердость по Бринеллю	HV	$HV = h_0 + \frac{\Delta(HV_n^0)}{\Delta(HV_n^1)} HV_n^1$
Примечания: 1. Символами "I" и "O" помечены входные значения. 2. $\Delta(\dots)$ – поле рассеяния соответствующего ПК, определяемое в результате анализа статистических (априорных) материалов о результатах применения метода. 3. r_0, u_0, h_0 – определяют экспериментально.		

товления детали определяет его технологическую структуру, устойчиво обеспечивающую заданное качество.

2. Эффективная технологическая структура процесса может быть построена лишь на основе надежного количественного прогнозирования значений ПК на каждом этапе проектируемого процесса и учета условий взаимодействия методов разной физической природы.

3. Максимальные отклонения значений фактических и номинально заданных ПК возникают в зонах взаимодействия методов разной физической природы, в частности обработки резанием и термической обработки.

4. Поля рассеяния показателей геометрической формы и поверхностного слоя обрабатываемых стальных заготовок после термической обработки увеличиваются в 1,5...2 раза и более. Отклонения размера становятся соизмеримыми с припусками на последующую обработку, что снижает надежность обеспечения качества детали.

5. Изменения значений ПК в процессах изготовления деталей, включающих обработку резани-

ем и термическую обработку, с относительной погрешностью, не превышающей 25...40 %, можно описывать с помощью рекуррентного использования разработанных моделей реализации технологических методов.

6. Изготовление деталей осуществляется при реализации технологических структур четырех основных типов, различающихся по числу и месту в них операций термической (химико-термической) обработки. Каждой структуре соответствуют собственные закономерности формирования и прогнозирования ожидаемого качества, значения характеристик изменения (наследования) свойств.

Решение задачи прогнозирования значений ПК может осуществляться в виде последовательности процедур:

- идентификация типа технологической структуры ТП;
- формирование математического аппарата прогнозирования изменений ПК в соответствии с типом идентифицированной структуры, определение необходимого информационного обеспечения;
- выполнение прогнозирования изменений ПК в ТП.

Обеспечение качества изготовления деталей может потребовать корректировки спроектированного маршрутного ТП, выполняемого по разработанным стратегиям. Выбор стратегии определяется значением необходимой коррекции ПК и типом реализующей технологической структуры.

Вывод

Применение при проектировании ТП предложенной методики прогнозирования изменений значений ПК, учитывающей взаимодействие методов обработки резанием и термической обработки, позволяет обеспечивать значения множества ПК детали с надежностью не менее 0,8...0,9, а также при необходимости оптимизировать структуру процесса.

Библиографический список

1. Васильев А.С., Дальский А.М. и др. Направленное формирование свойств изделий машиностроения. М.: Машиностроение, 2005. 352 с.
2. Кондаков А.И., Васильев А.С. Выбор заготовок в машиностроении: справочник. М.: Машиностроение, 2007. 560 с.



В.Н. Штенников, канд. техн. наук (ФГУП УЭМЗ, г. Екатеринбург)

Рекомендации по обеспечению требуемых режимов конвекционной пайки

В настоящее время отсутствуют научно-обоснованные рекомендации по формированию оптимального температурного профиля конвекционной пайки. В статье приведены рекомендации по режимам конвекционной пайки.

Now there are no scientifically-proved recommendations of the convection soldering. In article contain recommendations about modes of the convection soldering.

Ключевые слова: прибор, сборка, качество, пайка, температура.

Key words: the device, assemblage, quality, the soldering, temperature.

На надежность паяных соединений влияет ряд факторов: время пайки, паяемость соединяемых поверхностей, используемый флюс, состав припоя, зазор между деталями. Но наибольшее влияние на надежность оказывает температура пайки. Так, если время пайки электронных приборов припоем ПОС61 может изменяться в сотни раз (от 0,03 с при лазерной пайке до 90 с при конвекционной пайке), то температура пайки при этом – только в пределах $\pm 13\%$ (265...205) °С [1].

Отсутствие научно обоснованных рекомендаций по формированию температурного профиля конвекционной пайки порождает недостаточно обоснованные предложения и рекомендации.

Так, в работе [2] предпринята попытка выделить основные факторы, влияющие на скорость нагрева и охлаждения печатного узла при конвекционной пайке. Начальные и граничные условия, решение поставленной задачи в статье не рассмотрены, ссылки на первоисточники отсутствуют. Рекомендации основаны на ошибочной зависимости, в которой размерность левой и правой частей не совпадают. Выводы имеют противоречивый характер и не могут быть использованы специалистами. В частности, из предложенного уравнения следует, что количество теплоты, передаваемой компоненту при конвекционной пайке, а следовательно, и тем-

пература будут расти до бесконечности при неограниченном увеличении времени пайки, что невозможно по причине конечной температуры теплоносителя [2]:

$$Q = hAt'\Delta T, \quad (1)$$

где Q – количество переданной теплоты;

h – теплоемкость материала (способность материала поглощать или отдавать тепло);

A – площадь поверхности изделия;

t' – время;

ΔT – разность температур материала и источника нагрева.

Вид формулы, обозначения и их определения взяты из оригинала.

Итак, определим влияние основных факторов на скорость нагрева и охлаждения печатного узла при конвекционной пайке. Для этого используем модель реального печатного узла – *тело с бесконечно большой теплопроводностью*.

Основные допущения, принятые в упомянутой работе, следующие: постоянство коэффициента теплообмена между поверхностью печатного узла и воздухом, однородность температурного поля в объеме печатного узла.

Полученные формулы позволяют достаточно корректно оценить среднюю температуру печатного узла в зависимости от температуры теплоносителя (воздуха или азота), площади поверхности печатного узла, его теплоемкости и коэффициента теплообмена.

На основании полученных аналитических зависимостей можно определить влияние тех или иных факторов на температурный профиль конвекционной пайки, который необходимо обеспечить, исходя из требований производителей паяльных паст, литературных источников и международных стандартов IPC, рекомендованных для применения [3].

Условие теплового баланса может быть записано в следующем виде:

$$C_{\Pi} dt = \alpha t S_{\Pi} d\tau, \quad (2)$$



где C_n – теплоемкость печатного узла, Дж·°С⁻¹;
 t – превышение температуры теплоносителя над температурой печатного узла в соответствующей зоне, °С;

α – коэффициент теплообмена, Вт·°С⁻¹·м⁻²;
 S_n – площадь поверхности печатного узла, м²;
 τ – время, с.

Путем элементарных преобразований, учитывая, что при нагреве $t_{\tau \rightarrow \infty} = t_T$; $t_{\tau \rightarrow 0} = 0$, где t_T – температура теплоносителя, °С, получим выражение для температуры печатного узла при конвекционном нагреве:

$$t_n = t_T (1 - e^{-\tau/\tau_0^H}), \quad (3)$$

где τ_0^H – постоянная времени нагрева печатного узла, с;

$$\tau_0^H = \frac{C_n}{\alpha_n S_n}, \quad (4)$$

где α_n – коэффициент теплообмена при нагреве.

Решая аналогичную задачу для режима охлаждения, получим:

$$t_0 = t_T e^{-\tau/\tau_0^O}, \quad (5)$$

$$\tau_0^O = \frac{C_n}{\alpha_0 S_n}, \quad (6)$$

где τ_0^O – постоянная времени охлаждения печатного узла, с;

α_0 – коэффициент теплообмена при охлаждении.

В общем случае постоянные времени нагрева и охлаждения печатного узла могут отличаться за счет различной скорости движения и состава теплоносителя. Скорость нагрева печатного узла и охлаждения после пайки тем больше, чем больше скорость движения нагретого воздуха (азота), которая увеличивает коэффициент теплообмена [4].

Таким образом, постоянные времени нагрева и охлаждения печатного узла при конвекционной пайке пропорциональны коэффициенту теплообмена, площади его поверхности и обратно пропорциональны его теплоемкости.

Пользуясь зависимостями (4) и (6), можно сделать вывод о том, что паяные соединения, находящиеся в различных условиях обдува теплоносителем, будут нагреваться с различной скоростью, что может привести к несоблюдению требуемого температурного режима пайки, например, для компонентов корпусов ВГА с шариковыми выводами под корпусом, а также к образованию дефекта "надгробного камня" [5].

Уменьшение температуры теплоносителя в соответствующей зоне паяльной печи при одновременном увеличении его скорости движения перед финишным нагревом печатного узла до температуры пайки дает возможность более равномерно прогреть электронные компоненты вне зависимости от соотношения их площади поверхности и теплоемкости [6].

С другой стороны, наличие на печатной плате компонентов в одинаковых корпусах и отсутствие корпусов ВГА позволяют исключить упомянутую выдержку без снижения качества пайки [6].

Вывод

Опыт предприятия по отработке режимов конвекционной пайки печатных плат с Fine-Pitch компонентами показал, что развитие научного направления по обеспечению требуемых параметров монтажа электронных приборов позволяет существенно повысить эффективность отработки соответствующих технологических процессов, уточнить рекомендации международных стандартов.

Библиографический список

1. Ланин В. Лазерная пайка при сборке электронных модулей // Технологии в электронной промышленности. 2007. № 6. С. 40–44.
2. Димок Фред, ДиМаттео Роб. Достижение и контроль значений охлаждения в печах оплавления // Производство электроники: технологии, оборудование, материалы. 2008. № 4. С. 51–54.
3. Easy Profile 256 NA No-Clean Solder Paste Supplemental Data Packade. www.kester.com.
4. Лыков А.В. Теплообмен. Справочник. 2-е изд., М., Энергия, 1978. 480 с.
5. Причины возникновения надгробного камня. <http://www.siplace.ru/soldering/gravestone>
6. Штеников В.Н. Опыт ФГУП УЭМЗ по внедрению технологии поверхностного монтажа печатных плат с Fine-Pitch-компонентами // Новые промышленные технологии. 2008. № 5. С. 42–43.



УДК 621.438

О.В. Виноградова, В.Н. Шишкин*(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)*

Системообразование структурно-параметрических моделей в задачах совершенствования эксплуатационных характеристик элементов авиационного ГТД

Предложен способ системообразования структурно-параметрических функциональных моделей элементов газотурбинного двигателя (ГТД), позволяющий на основе имеющихся измерительно-вычислительных средств существенно повысить эксплуатационные характеристики изделия за счет всестороннего учета влияния на них параметров различной физической природы.

The method of the network of structure-parametric models of gas-turbine engines component which allow considerably raise operation characteristics by measuring-calculating means at the expense of detailed calculation of influence different physical character parameters have been suggested.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, эксплуатационные характеристики.

Key words: gas-turbine engine, operating characteristics.

При оптимальном проектировании и производстве сложных механических систем наиболее перспективной является "увязка" фактических характеристик изделия с реальными размерами деталей, свойствами их материала, режимными характеристиками, "человеческим фактором", существенно влияющим на качество продукции, особенно в массовом и серийном производстве.

В результате могут быть получены количественные оценки прогноза эффективности предполагаемых мероприятий, определены последствия допущенных отклонений при изготовлении сложно-профильных деталей, найдены варианты сборки, взаимно компенсирующие эти отклонения, обеспечена контролепригодность элементов изделия, снижена трудоемкость изготовления деталей и даже повышен их ресурс.

Решение данной задачи, относящейся к области системного совершенствования сложного многопараметрического и многокритериального объек-

та, лежит на пути формализованного представления и эффективной обработки текущей и ретроспективной информации различной физической природы и выходит за пределы компенсации отдельных научных дисциплин (газодинамики, прочности, металлургии, технологии). Необходимо достаточно формально на основании накопленного опыта, представленного в виде проблемно-ориентированных матриц данных входных переменных V и выходных переменных Y , найти эффективные технические решения, актуальные в данный момент.

Если для заданных значений входных переменных X_0 определяются значения выходных переменных Y_0 – решается задача прогнозирования (анализа). Если же наоборот, по заданным значениям Y_0 определяются параметры X_0 – решается задача оптимизации (синтеза).

Матрицы V и Y имеют по N строк, каждая из которых соответствует одному расчетному, лабораторному или натурному эксперименту. Если число m столбцов матрицы Y (целевых функций) почти всегда невелико и определяется хорошо известными требованиями к объекту, то формирование K столбцов матрицы X (входных параметров) связано с высоким уровнем неопределенности.

Пытаясь включить в рассмотрение все потенциально существенные параметры различной физической природы в исходном их представлении (координатные измерения, химический состав применяемых сплавов и др.), мы лишь увеличиваем неопределенность и все дальше уходим в область информационной недостаточности даже при большом количестве имеющихся наблюдений N . Необходимо найти пути и способы сжатия этой первичной информации без ее существенных потерь и уже затем помещать эту сжатую информацию в матрицу данных V . В этом случае появляется возможность при разумных соотношениях между N и K

решать как задачи прогноза (анализа), так и оптимизации (синтеза).

Рассмотрим пять основных видов первичной многомерной информации, нуждающейся в систематизации и сжатии (рис. 1).

1. Координатные измерения сложно-профильных элементов проточной части (осевых лопаток турбин и компрессоров, диагональных колес и др.). Координаты X, Y, Z сложных поверхностей преобразуются в три различные группы параметров:

- параметры **плоской решетки** для оценки газодинамических характеристик профильной части пера лопатки в системе превентивного контроля;
- **главные компоненты профилей** для использования их как структурных факторов в матрицах данных X в задачах оптимизации параметров турбомашин;
- **главные компоненты газодинамических характеристик**, используемые в качестве целевых функций.

2. Химический состав сталей и сплавов используют:

■ в качестве входных переменных для установления функциональных соотношений его с физическими параметрами сплавов в целях дальнейшего перехода к оценке теплового и напряженно-деформированного состояния элементов изделия;

■ для прогнозирования служебных характеристик при входном контроле материалов ответственных деталей;

■ в процессе оптимальной подшихтовки жаропрочных сплавов.

3. Изображения на плоскости экрана монитора ПК используются для:

- ♦ получения главных компонент изображений теплового или напряженно-деформированного состояния ответственных элементов изделия в целях решения задач многокритериальной оптимизации;
- ♦ получения главных компонент различных микроструктур сплавов в целях формального сопоставления их с эксплуатационными характеристиками;

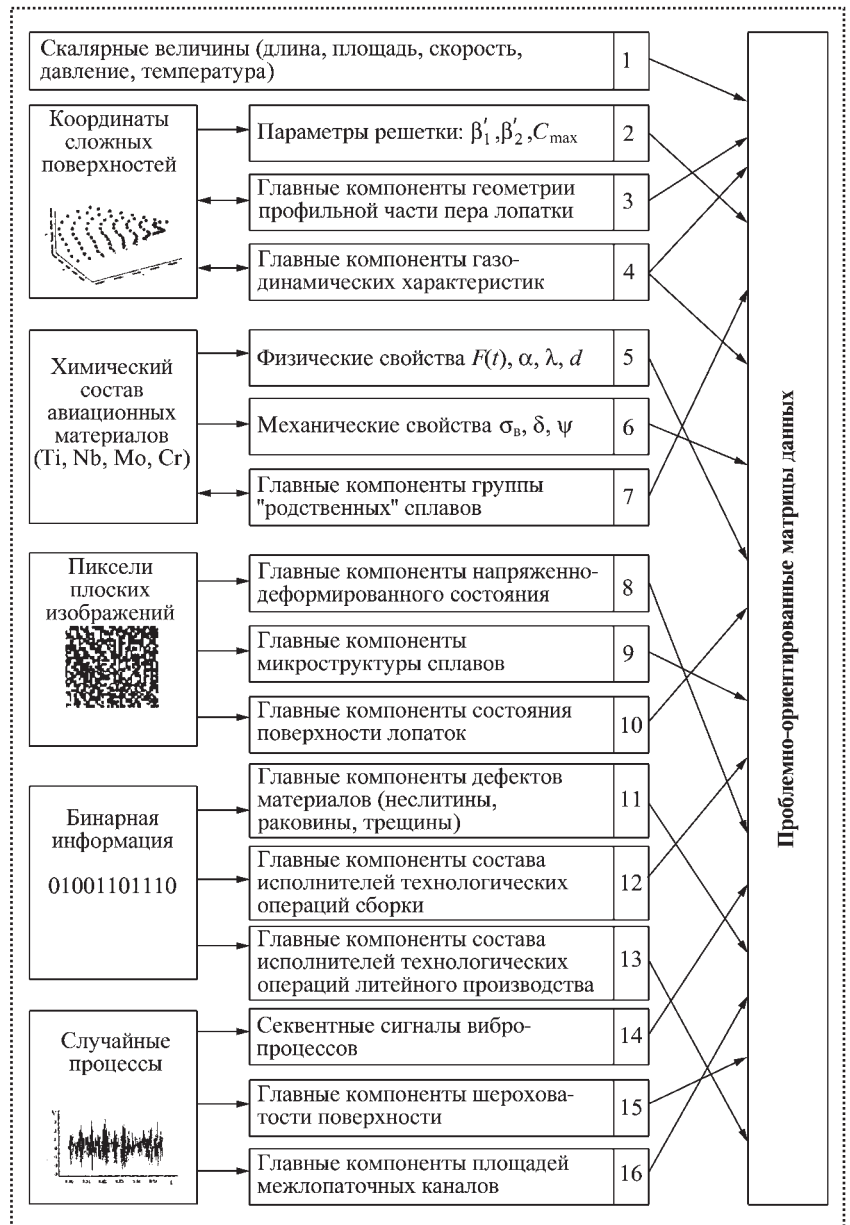


Рис. 1. Схема преобразования первичной информации в проблемно-ориентированные матрицы данных

- ♦ получения главных компонент поверхности лопаток для оценки их остаточного ресурса.

4. Бинарная информация используется для:

- представления в пространстве главных компонент сочетаний дефектов материалов (неслитин, раковин, трещин и др.) при совершенствовании качества керамических материалов;
- представления в пространстве главных компонент составов исполнителей основных технологических операций для учета "человеческого фактора" в задачах совершенствования качества сборки, литейного производства и др.



5. Оцифрованные случайные процессы (временные ряды) используются для:

- получения секвентных сигналов в диагностике технического состояния трансмиссий;
- получения главных компонент шероховатости поверхности для увязки ее с газодинамическим качеством профильной части пера лопатки;
- получения главных компонент распределения площадей межлопаточных каналов сопловых аппаратов в задачах комплектовки двигателя.

Если первичные параметры различной физической природы g непосредственно не несут полезной информации об исследуемом объекте, то после перехода к параметрам второго уровня U (главным компонентам, физическим свойствам материалов, параметрам решетки и т.д.) становится возможным оценивать характеристики верхнего уровня – структурные факторы Z , непосредственно связанные с эксплуатационными характеристиками узла (рис. 2).

Представление системы в виде иерархической структуры является достаточно продуктивным. Удастся увязать взаимное влияние большого числа переменных, так или иначе определяющих характеристики качества объекта, и найти ряд нетривиальных решений.

Рассмотрим пример.

При оптимальном проектировании сложнопрофильных элементов ГТД, в частности лопаток компрессора или турбины, широко используют систему ANSYS, позволяющую оценить напряженно-деформированное состояние, спектр резонансных частот, температурное состояние конструкции с точностью до гипотез, заложенных в эту систему

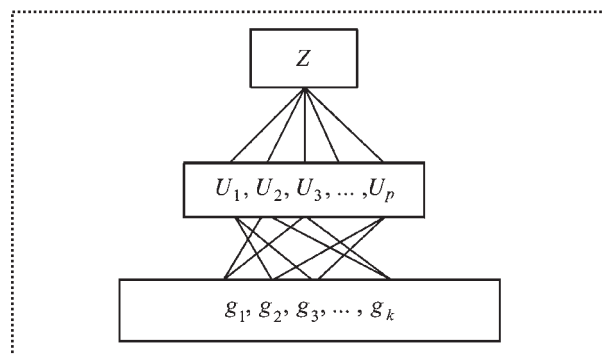


Рис. 2. Взаимосвязь функционала Z с входными переменными:

p – количество параметров второго уровня; k – количество первичных параметров

[1]. Для обеспечения этих характеристик, как правило, варьируют геометрической формой лопатки. Свойства же выбранного материала, задаваемого модулем упругости E , коэффициентом линейного расширения α , коэффициентом теплопроводности λ , а также плотностью d в одинаковом диапазоне температур, сохраняют. Попытка обеспечить, например, требуемое напряженно-деформированное состояние вариации только геометрической формой лопатки, оказывается неудачной – остается некоторый "недоход" до цели. Кроме того, остаются неиспользованными резервы совершенствования материала по комплексным критериям. Например, за счет подшихтовки данного сплава в пределах его марочного состава может быть уменьшена плотность материала, что напрямую связано с уменьшением массы конструкции.

Рассмотрим возможности комплексного совершенствования расчетных характеристик широкохордной компрессорной лопатки. В качестве опорных выберем шесть различных титановых сплавов. Представим в виде таблиц (здесь не приводятся) химический состав этих сплавов, модуль упругости E , коэффициент линейного расширения α , коэффициент теплопроводности λ и плотность d . Для этих данных при заданной геометрии рассчитаем значения частотных параметров и максимального напряжения (табл. 1).

В табл. 1 представлены расчеты $Y_1 - Y_5, \sigma_{\max}$ при заданных физических свойствах E, α, λ и плотности материала d .

Из табл. 1 видно, что при изменении плотности и других физических свойств практически остаются неизменными собственные частоты f_1 и f_2 , а также Y_5 – изгибно-крутильная связанность колеба-

1. Расчетные значения частотных параметров и напряжений

$d, \text{г/мм}^3$	$Y_1 = f_1, \text{Гц}$	$Y_2 = f_2, \text{Гц}$	$Y_3 = f_3, \text{Гц}$	$T_4 = f_4, \text{Гц}$	Y_5	$\sigma_{\max}, \text{МПа}$
4,55	142	331	385	616	0,364	422
4,40	143	332	387	619		421
4,42	142	329	381	610	0,363	414
4,45		332	386	618	0,364	420
4,43	143	335	391	625	0,365	414
4,45		333	389	621		422



2. Матрица главных компонент химического состава шести сплавов

U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
1,564	-0,138	2,278	-0,110	0,692
-0,740	-0,570	0,649	0,948	-0,861
0,090	0,719	0,787	-0,247	-0,787
1,855	-0,104	-2,538	-0,142	-0,134
-1,237	0,241	-0,815	1,590	0,798
-1,532	-0,149	-0,361	-2,040	0,291

ний. Изменяются собственные частоты высоких форм колебаний f_3 и f_4 и максимальное напряжение σ_{\max} .

Для химического состава сплава получим матрицу главных компонент U_1, U_2, \dots, U_5 (табл. 2).

Для параметров E, α, λ , взятых друг за другом при данной температуре, получим матрицу главных компонент V_1, V_2, \dots (табл. 3).

Методом случайного поиска с адаптацией находим зависимости главных компонент физических свойств материалов от главных компонент химического состава:

$$\begin{aligned} U_1 &= -0,3282157 + 0,3961194V_2 + 0,2796729V_4, \\ U_2 &= 0,1411781 - 0,1065594V_2V_3 + 0,1800004V_2V_4, \\ U_3 &= -1,054736 + 0,5053465V_2V_3 - 0,4122443V_3V_4, \\ U_4 &= 0,01132637 + 0,1027894V_4 - 0,6780586V_1V_4, \\ U_5 &= -0,04799123 + 0,1034923V_2 + 0,2470693V_3V_4. \end{aligned} \quad (1)$$

Соотношения (1) позволяют оценивать физические свойства материала при изменении его хими-

3. Матрица главных компонент физических свойств шести сплавов

V_1	V_2	V_3	V_4
-0,878	4,566	1,642	0,467
0,191	1,505	0,813	-2,195
0,367	0,318	-1,085	3,809
0,470	0,386	-0,506	0,557
1,688	0,044	-0,813	-1,756
-1,668	-1,551	-2,273	-1,302

ческого состава, а затем проводить расчет характеристик прочности лопатки в системе ANSYS.

Получим зависимости f_3, f_4, σ_{\max} и d от главных компонент химического состава:

$$\begin{aligned} f_3 &= 386,4779 - 6,290992U_2 - 3,836731U_1U_5, \\ f_4 &= 618,1833 + 11,63662U_2U_5 + 2,842711U_4U_5, \\ \sigma_{\max} &= 41,88323 - 0,6741477U_2 + 0,09654798U_1U_4, \\ d &= 4,450142 - 0,01649953U_2U_5 + 0,05737351U_3U_5. \end{aligned} \quad (2)$$

Соотношения (2) позволяют решать ряд экстремальных задач: находить химический состав материала с заданной плотностью при ограничениях на собственные частоты различных форм колебаний и напряжения, проводить отстройку собственных частот от нежелательных резонансов.

Располагая функциональными соотношениями между расчетными эксплуатационными характеристиками лопатки и компонентами химического состава сплава, можно рассмотреть многие другие сценарии повышения его характеристик.

Аналогичные преобразования данных проведем для турбинной лопатки.

Геометрическая форма лопатки (здесь не приведена), зависимости E, α, λ от температуры используются для расчета трех целевых функций: максимальных напряжений на спинке и корытце $\sigma_{\max c}$, $\sigma_{\max k}$ и максимальной температуры T_{\max} .

Данные химического состава преобразуем в матрицу главных компонент $U_1 - U_5$ (табл. 4). Для выбранных сплавов проведем расчет напряженно-деформированного состояния и представим их также в табл. 4.

Для лопатки № 6 зададимся требуемыми значениями целевых функций $Y_3 = 1020$ °С, $Y_1 = 33$ кг/мм², $Y_2 = 33$ кг/мм², т.е. обычными для других сплавов, из которых могла бы быть изготовлена данная лопатка.

По полученным целевым функциям Y_1, Y_2, Y_3 и таблице главных компонент (см. табл. 4) найдем структурные уравнения связи:

$$\begin{aligned} Y_1 &= 32,01964 + 0,8452105U_1 + 0,9373103U_2, \\ Y_2 &= 31,41976 + 0,5410677U_1 + 0,6435058U_2, \\ Y_3 &= 1027,5 - 1,265075U_1 - 4,977493U_2. \end{aligned} \quad (3)$$

Используя уравнение (3) как математическую модель объекта с высокими значениями коэффициентов множественной корреляции методом слу-



4. Матрица главных компонент химического состава сплавов и конструкционных характеристик лопатки

№ лопатки	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	Y_1 ($\sigma_{\max k}$, МПа)	Y_2 ($\sigma_{\max c}$, МПа)	Y_3 (T_{\max} , °С)
1	1,483	1,220	-2,591	0,325	-0,185	34,217	32,326	1021
2	1,619	-0,213	0,191	-0,960	0,817	33,439	32,438	1023
3	1,870	0,584	1,262	-0,741	-0,766	33,888	32,901	1024
4	-4,220	2,725	0,127	-0,299	0,031	31	30,921	1019
5	0,919	0,671	1,281	1,575	0,227	33,698	32,726	1023
6	-1,672	-4,987	-0,271	0,100	-0,124	25,875	27,206	1055

5. Рекомендуемый вариант дошихтовки сплава $\left(\begin{array}{l} \text{исходный вариант} \\ \text{новый вариант} \end{array} \right)$

C	Si	Mn	Cr	V	Mo	Ti	Al	Fe	B	Ce	S	P	W	Co	Nb
$\frac{0,165}{0,138}$	$\frac{0,4}{0,474}$	$\frac{0,4}{0,474}$	$\frac{8,75}{13,21}$	$\frac{0,010}{2,011}$	$\frac{1,80}{4,338}$	$\frac{2,45}{2,374}$	$\frac{5,55}{3,661}$	$\frac{1,0}{4,232}$	$\frac{0,001}{0,021}$	$\frac{0,001}{0,010}$	$\frac{0,005}{0,012}$	$\frac{0,008}{0,015}$	$\frac{10,25}{3,277}$	$\frac{9,750}{1,030}$	$\frac{1}{0}$

чайного поиска с направляющим конусом, для значений целевых функций и базовых значений главных компонент сплава № 6 (см. табл. 4) получим соответствующие значения главных компонент химического состава.

U_1	U_2	U_3	U_4	U_5
-1,672	-4,987	-0,271	0,100	-0,124

Проведем обратный переход к натуральным значениям химического состава сплава ($X = F^T \cdot U_{0i}$) и вычтем из базовых значений сплава № 6 (см. табл. 4) найденное содержание элементов. В результате получим рекомендации по возможной дошихтовке сплавов, обеспечивающей заданные требования к Y_1 , Y_2 , Y_3 (табл. 5).

Таким образом, используя одну и ту же систему оценки эксплуатационных характеристик различных лопаток, удалось построить структурно-параметрические зависимости этих характеристик от конкретных элементов химического состава титанового и никелевого сплавов.

Данный системный подход к анализу сложной многопараметрической системы позволил обеспе-

чить требуемое напряженно-деформированное состояние без изменения геометрической формы лопаток, что очень важно в серийном производстве. При этом для компрессорной лопатки найдена возможность снижения плотности материала на 4...5%. Это эквивалентно существенному снижению веса конструкции. Для турбинной лопатки удалось одновременно обеспечить тепловое и напряженно-деформированное состояние на спинке и корытце лопатки.

Вывод

В данных примерах были использованы только 5-й и 7-й комплексные параметры (см. рис. 1) при формировании проблемно-ориентированных матриц данных. Использование комплексных параметров в различных комбинациях позволяет решать широкий круг задач системного совершенствования качества изделия.

Библиографический список

1. Безъязычный В.Ф., Виноградова О.В., Заваркин В.Н., Калюкин Ю.Н., Шишкин В.Н. Квалиметрический анализ и синтез ресурсных характеристик лопаток турбин авиационного ГТД // Заготовительные производства. 2005. № 8. С. 40–46.



УДК 658.512:621.7:621.9+388.94

М.Л. Хейфец, д-р техн. наук, А.А. Лысов, канд. техн. наук, Н.А. Кусакин, канд. техн. наук,
Г.Б. Премент (Полоцкий государственный университет, Новополоцк, Беларусь)

Управление наследованием показателей качества при восстановлении, обработке, сборке и эксплуатации деталей машин

Предложена методология статистического анализа технологического и эксплуатационного наследования показателей качества деталей машин. Статистический анализ технологического и эксплуатационного наследования при восстановлении рабочих поверхностей коленчатых и распределительных валов двигателей позволил регламентировать технологические воздействия и обеспечить высокое качество восстановления.

The methodology of the statistical analysis of technological and operational inheritance of parameters of quality of details of machines is offered. Basic difference of inheritance in technological process of restoration of the worn out surfaces from inheritance in rational process of machining of surfaces of details is shown.

Ключевые слова: показатели качества, наследование, восстановление, обработка, сборка, эксплуатация.

Key words: quality metrics, inheritance, reduction, manufacturing, assembly, service.

Введение. Обеспечение высокого качества продукции на этапе создания и освоения изделий заключается в организации такой технологической подготовки и осуществлении производства, при которых продукция соответствовала бы требованиям конструкторской документации и не имела бы вредных последствий от технологических методов обработки [1].

Поэтому все операции и их технологические переходы следует рассматривать не изолированно, а во взаимосвязи, так как конечные характеристики формируются всем комплексом технологических воздействий и изменяются при эксплуатации машины, ее техническом обслуживании и ремонте [1, 2].

Под **наследственностью** в технологии машиностроения подразумевают явление переноса свойств

обрабатываемого объекта от предшествующих операций и переходов к последующим, которое в дальнейшем сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин [3, 4].

Носителями наследственной информации являются обрабатываемый материал и поверхности детали со всем многообразием описывающих их показателей.

Носители информации активно участвуют в технологическом процессе и на стадиях эксплуатации, проходя через различные трансформации, испытывая воздействия технологических и эксплуатационных факторов [4, 5].

В цепочке технологических операций и при эксплуатации существуют своего рода "барьеры". Некоторые технологические факторы преодолеть эти "барьеры" не могут и в таком случае их влияние на дальнейшие свойства объекта отсутствуют. Другие факторы такие "барьеры" проходят, но при этом значительно теряют свою исходную силу и влияют на конечные свойства очень слабо [2, 3].

Следовательно, процессом технологического и эксплуатационного наследования можно управлять, с тем чтобы свойства, положительно влияющие на качество детали, сохранить в течение всей обработки и эксплуатации, а свойства, влияющие отрицательно, ликвидировать после их появления [4, 5].

До недавнего времени в математическом описании технологического и эксплуатационного наследования использовались различные аналитические модели [2], так как считали, что управление процессами обработки детерминировано технологическими воздействиями на конкретных операциях технологического процесса [3], а управление при эксплуатации зависит от внешних стохастических факторов, влияние которых существенно изменяется в процессе изнашивания деталей машин [4, 5].

Однако в последнее время на основании анализа самоорганизации поверхностных явлений в тех-



нологических и эксплуатационных процессах показано, что их следует описывать с единых синергетических позиций [6]. При таком описании определяют ограниченное число сценариев поведения технологических и эксплуатационных систем, которыми можно управлять в устойчивых диапазонах выходных параметров качества. В результате обеспечивается возможность описания многократных циклов "производство—эксплуатация", которым подвергают детали машин при их технологическом обслуживании и ремонте.

Цель работы – формирование методологии статистического анализа сквозного технологического и эксплуатационного наследования и изучение особенностей передачи показателей качества при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин для структурно-параметрической оптимизации технологических процессов.

Методология статистического анализа технологического и эксплуатационного наследования. Технологический процесс изготовления детали и ее эксплуатации в узле машины может быть представлен в виде графа, выделяющего заготовительные, черновые, чистовые и отделочные операции, а также обкатку, приработку и изнашивание на стадиях эксплуатации [2, 4]. Граф, как правило, является ориентированным [5], а показатели качества взаимосвязаны между собой (рис. 1).

Начальная вершина графа в технологическом процессе представляет собой заготовку (З), а конечная вершина в процессе эксплуатации – изношенную деталь (Д). Ориентированные ребра графа показывают передачу показателей качества детали

при обработке, сборке и эксплуатации машин. Передача ребра описывается коэффициентом наследования K , показывающим количественное изменение свойства и равным отношению предыдущих S_{i-1} и последующих S_i значений свойства [2, 5]:

$$K = S_{i-1}/S_i.$$

Вместе с прямой передачей свойств (см. рис. 1, сплошные линии) при технологическом и эксплуатационном наследовании целесообразно оценивать взаимовлияние свойств (см. рис. 1, штриховые линии). Общую структуру процессов производства и эксплуатации можно представить как сложную многомерную систему в виде последовательности изменения основных показателей качества детали [2, 4]. На вход технологической системы обработки поступают различные характеристики заготовки $\{S_{10}, S_{20}, \dots, S_{m0}\}$, а на выходе эксплуатационной системы обеспечивается соответствующий набор тех же характеристик для изношенной детали $\{S_{1p}, S_{2p}, \dots, S_{mp}\}$. Эти изменения определяются действием совокупности факторов $\{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}\}$ для каждой текущей ϕ_i операции технологического процесса и стадии эксплуатации машины [3, 4]. Так, для показателя качества S_i с учетом предыдущей обработки или эксплуатации [2, 4]:

$$S_i = a_i S_{i-1}^{b_i}.$$

Количественные связи технологической и эксплуатационной наследственности, зависящие от выбора методов обработки и условий эксплуатации, определяют коэффициентами b , а основные

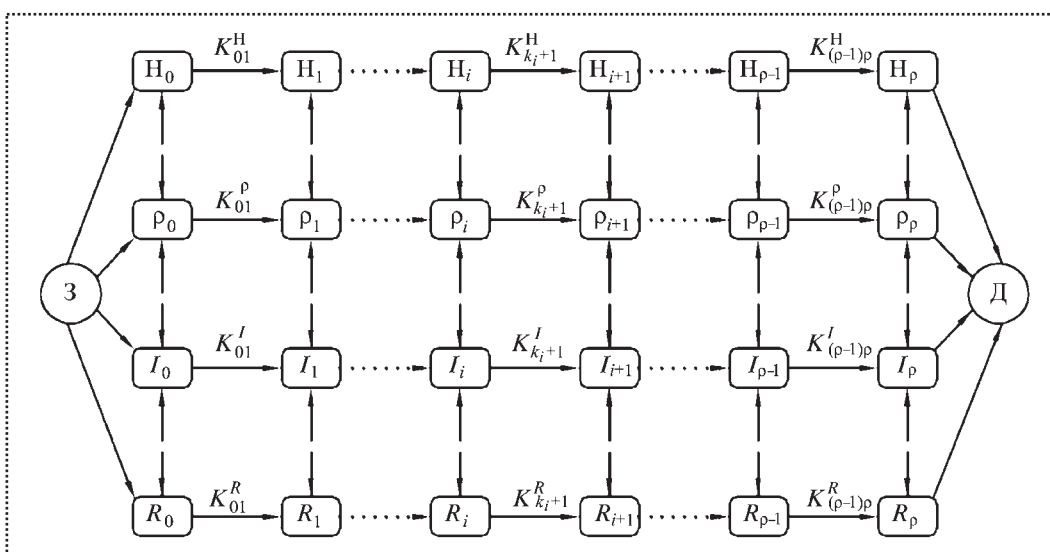


Рис. 1. Развернутый граф технологического и эксплуатационного наследования, учитывающий комплекс показателей качества:

H – показатели твердости; p – показатели точности формы; I – показатели точности размеров; R – показатели рельефа поверхности

режимы обработки и эксплуатации внутри этих методов или условий – коэффициентами a . Коэффициент a_i описывает влияние факторов $t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}$ на рассматриваемый параметр качества S_i для операции или стадии φ_i и может быть представлен [2, 3]:

$$a_i = k_{i0} t_{i1}^{k_{i1}} t_{i2}^{k_{i2}} \dots t_{in}^{k_{in}},$$

где $k_{i0}, k_{i1}, k_{i2}, \dots, k_{in}$ – эмпирические коэффициенты влияния технологических или эксплуатационных факторов.

Выполнив преобразования для показателей качества, получим описание коэффициента наследования:

$$K = a_i^{b_i} / S_i^{b_i+1}.$$

Анализ зависимости показывает, что производство и эксплуатация могут быть представлены в виде:

■ передачи значений свойств S_i (см. рис. 1, сплошные линии) между операциями и стадиями, которые описываются знаменателем отношения;

■ взаимовлияния свойств (см. рис. 1, штриховые прерывистые линии) на конкретной операции или стадии через действие a_i совокупности факторов t_i , с учетом предшествующего значения свойства, которое описывается числителем отношения.

В результате представление технологического и эксплуатационного наследования совокупности свойств $\{S_{1i}, S_{2i}, \dots, S_{mi}\}$ может быть трансформировано (рис. 2) с учетом выделения и описания взаимовлияния отдельных S_1, S_2, \dots, S_m показателей качества и совокупности факторов $\{t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{in}\}$ на ка-

ждой операции или стадии φ_i [3]. Упрощение структурной модели наследования показателей качества (см. рис. 2) путем минимизации количества ребер графа для сокращения объема исходных данных при статистическом анализе возможно посредством выделения основных параметров качества и определяющих связей при наследовании свойств.

Если на какой-либо операции или стадии φ_i коэффициент $b_i = 0$, то это означает отсутствие влияния исходного качества состояния заготовки на окончательное состояние после данного воздействия, что может служить интерпретацией действия операции и стадии φ_i как непреодолимого "барьера" [2, 3].

Для выявления основных наследуемых в эксплуатации показателей качества, посредством контроля которых целесообразно управлять технологическим процессом, проводился АВС-анализ изменения в процессе эксплуатации [7] начальных геометрических параметров поверхности и физико-механических характеристик материала [2].

АВС-анализ (рис. 3) показал, что в большинстве случаев, уже в период приработки I существенно меняется шероховатость 1 и структура поверхностного рельефа 2. Волнистость 3 и структура поверхностных слоев 4 изменяются при установившемся изнашивании II. Точность размеров 5 и геометрическая форма поверхности 6 остаются в пределах допустимых значений даже в начале стадии катастрофического изнашивании III. Только остаточные напряжения 7 и структура основного материала 8

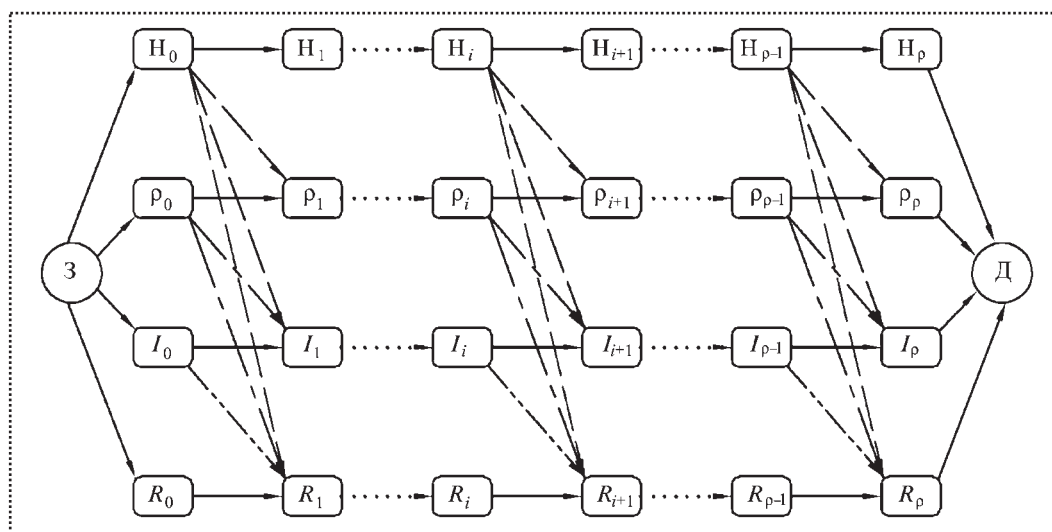


Рис. 2. Граф технологического и эксплуатационного наследования, отражающий взаимовлияние физико-механических и геометрических показателей качества

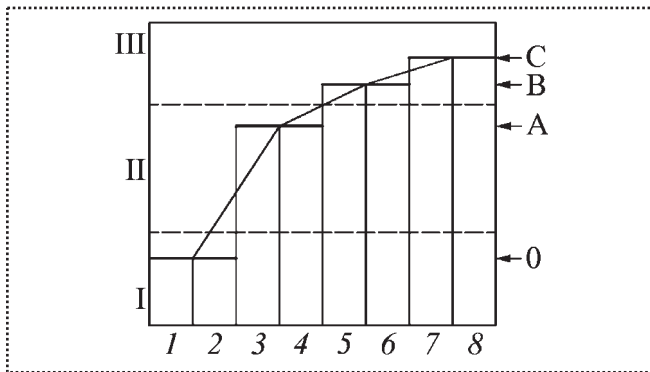


Рис. 3. ABC-анализ изменения в процессе эксплуатации (I–III) начальных показателей качества (1–8):

0 – формирование поверхности; A – изменение контактных нагрузок; B – выход детали из строя; C – полное разрушение поверхности; I – приработка; II – нормальное изнашивание; III – катастрофическое изнашивание; 1 – шероховатость поверхности; 2 – структура поверхностного рельефа; 3 – волнистость поверхности; 4 – структура поверхностных слоев; 5 – форма поверхности; 6 – точность размеров; 7 – остаточные напряжения; 8 – структура основного материала

могут сохраняться до полного разрушения трущихся поверхностей [2].

Поэтому для изучения наследования выбирались оперативные и наименее трудоемкие контролируемые физико-механические и геометрические показатели качества из начальной и конечной групп (0–С). При этом особое внимание уделялось показателям 5 и 6, претерпевающим существенные изменения в начале катастрофического износа В, связанным как с физико-механическими характеристиками материала 7, 8, так и с геометрическими параметрами рельефа поверхности 1, 3.

Изучение технологического наследования эксплуатационных свойств восстанавливаемых деталей. Изучение технологического наследования по предложенной методологии проводилось для наиболее часто восстанавливаемых деталей, отвечающих за ресурс ремонтируемых двигателей – коленчатых и распределительных валов [8].

Для описания технологического наследования эксплуатационных свойств коленчатых и распределительных валов в процессе восстановления рассматривалась совокупность физико-механических и геометрических свойств (см. рис. 1 и 2): твердости Н, отклонений формы ρ , точности размеров I и рельефа поверхности R.

Для этого в качестве определяющего свойства рабочих поверхностей деталей (см. рис. 3) прини-

малась физико-механическая характеристика δ – твердость по Роквеллу HRC, так как твердость является одним из наиболее распространенных и общедоступных интегральных критериев оценки свойств материалов, позволяющих судить о прочностных и триботехнических характеристиках материала. В качестве зависимых от твердости параметров последовательно рассматривались отклонения формы поверхностей ρ – биения ρ , точность размеров 5 – квалитет IT и шероховатость поверхности 1 – среднеарифметическое отклонение профиля Ra.

Эксплуатационные параметры качества рабочих поверхностей детали (HRC, ρ , IT и Ra) измерялись после технологических операций механической обработки: точения, шлифования, полирования, а также после обкатки двигателя и его дальнейшей эксплуатации.

Измерения твердости HRC, отклонений формы ρ , точности размеров IT и рельефа поверхности Ra проводились на партии из пятидесяти деталей. При этом партия разбивалась по величине износа на десять групп, а в качестве расчетного значения принималось среднеарифметическое в группе. На основании расчетных результатов определялись коэффициенты передачи наследования K^H , K^ρ , K^I , K^R и коэффициенты взаимовлияния наследования свойств $K^{H\rho}$, K^{HI} , K^{HR} , $K^{\rho I}$, $K^{\rho R}$, K^{IR} . Для оценки наследования по технологическому маршруту и по стадиям эксплуатации рассчитывались результирующие коэффициенты K_p , равные произведению соответствующих коэффициентов для параметров качества по всей последовательности операций и стадий. Для определения степени влияния наследования на различных технологических операциях и стадиях эксплуатации рассчитывались коэффициенты сравнения K_c , равные отношению коэффициентов взаимовлияния на предшествующих и последующих операциях или стадиях.

Изучение экспериментальных данных в процессе восстановления позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и геометрических показателей качества рабочих поверхностей **коленчатого вала двигателя**.

Коэффициенты передачи показывают, что технологический процесс восстановления коренным образом отличается от рационального технологического процесса механической обработки. При



механической обработке коленчатого вала на начальных операциях устраняется вредное влияние технологической наследственности, т.е. коэффициенты велики ($K \gg 1$) для геометрических и малы ($1 > K > 0$) для физико-механических параметров качества, а на заключительных операциях они стабилизируются ($K \rightarrow 1$).

При восстановлении коренных и шатунных шеек коленчатого вала в процессе ремонта двигателя как геометрические, так и физико-механические параметры сначала ухудшаются, а затем при механической обработке улучшаются. В результате по всему технологическому процессу физико-механические характеристики восстанавливаются, а геометрические (особенно связанные с микрорельефом поверхности) улучшаются.

Коэффициенты взаимовлияния позволяют оценить значимость как технологических операций, так и технологических факторов на отдельных операциях. Твердость материала существенно влияет на геометрические параметры и сильнее всего это влияние на заключительных операциях для отклонений формы. Геометрические параметры поверхностей коренных и шатунных шеек наследуются слабо, особенно на начальных операциях. Причем для микрорельефа поверхности (шероховатости) чистовые операции восстановления являются технологическими "барьерами" (так как K^{pR} и $K^{IR} \rightarrow 0$). Влияние предыдущих геометрических параметров на последующие невелико. Наиболее заметно происходит изменение коэффициентов передачи для погрешности формы и точности обработки от черновых к чистовым операциям.

Анализ зависимостей влияния технологических факторов на наследование параметров качества в процессе восстановления дал возможность выявить определяющие процессы передачи свойств при механической обработке поверхностей коренных и шатунных шеек коленчатого вала двигателя. При окончательном шлифовании на твердость HRC и шероховатость Ra поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей при шлифовании, а также скоростями вращения круга и заготовки. Поэтому для управления качеством обработки при равномерном припуске особое внимание следует уделять глубине резания и подаче шлифовального круга.

Изучение экспериментальных данных позволило определить основные зависимости технологического наследования физико-механических и гео-

метрических параметров качества **распределительного вала двигателя** в процессе восстановления.

При восстановлении распределительного вала, так же как и коленчатого, геометрические и физико-механические параметры сначала ухудшаются, а затем улучшаются. В целом по всему технологическому процессу физико-механические характеристики восстанавливаются, а геометрические улучшаются.

Геометрические параметры цилиндрических поверхностей опорных шеек наследуются слабо. Для микрорельефа поверхности операции восстановления играют роль технологических "барьеров". Дальнейшее влияние предыдущих геометрических параметров на последующие также невелико и сказывается только на точности обработки. Изменение твердости опорных шеек и кулачков распределительных валов двигателя показывает, что технологическими "барьерами" при восстановлении рабочих поверхностей являются операции наплавки, а окончательные геометрические параметры качества поверхностей формируются при шлифовании.

При исследовании технологических операций установлено, что в процессе электродуговой наплавки проволокой твердость поверхности стабилизируется (колебания в пределах 3...5 HRC). При этом исходные детали имели существенный разброс твердости: до 10...15 HRC. После наплавки проволокой заданная в технической документации твердость обеспечивается последующей термической обработкой. Геометрические параметры поверхности (радиальное биение ρ , точность размеров IT, шероховатость поверхности Ra) после черновой обработки наследуются на чистовых операциях шлифования шеек и кулачков распределительного вала. Геометрические отклонения поверхностей после правки распределительного вала сохраняются на последующих операциях обработки и сборки.

В результате анализа установлено, что в процессе электродуговой наплавки проволокой на твердость HRC поверхности оказывают влияние сила тока электрической дуги, диаметр наплавочной проволоки, а также скорости подачи и главного движения обработки. Определяющим параметром для управления качеством наплавки является сила тока. При окончательном шлифовании на твердость HRC и шероховатость Ra поверхности влияют радиальная и тангенциальная составляющие силы резания, которые определяются глубиной резания и подачей при шлифовании, а также скоростями круга и заготовки.



По результатам исследований разработаны регламенты для операций технологических процессов восстановления деталей, позволяющие обеспечить в процессе наплавки стабильную твердость и однородность материала покрытия, а в процессе закали — высокую твердость поверхности (53... 56 HRC). Устранены операции правки из технологических процессов восстановления для снижения взаимного радиального биения поверхностей до 0,02 мм и обеспечения требуемой точности рабочих поверхностей.

Вывод

Предложена методология анализа технологического и эксплуатационного наследования показателей качества деталей машин. Показано, что технологический процесс восстановления по коэффициентам передачи эксплуатационных свойств коренным образом отличается от рационального процесса механической обработки. Анализ технологического и эксплуатационного наследования при восстановлении рабочих поверхностей коленчатого вала и распределительного вала двигателя позволил пересмотреть последовательность технологических переходов (устранить операцию правки), регламентировать технологические воздействия (на операциях наплав-

ки, заковки и шлифования) и обеспечить качество восстановления (стабильная твердость и точность рабочих поверхностей).

Библиографический список

1. Ящерицын П.И., Акулович Л.М., Хейфец М.Л. Основы проектирования технологических комплексов в машиностроении. Минск: Технопринт, 2006. 248 с.
2. Технологические основы управления качеством машин / А.С. Васильев, А.М. Дальский, С.А. Клименко и др. М.: Машиностроение, 2003. 256 с.
3. Ящерицын П.И., Рыжов Э.В., Аверченков В.И. Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Наука и техника, 1977. 256 с.
4. Ящерицын П.И., Скорынин Ю.В. Работоспособность узлов трения машин. Минск: Наука и техника, 1984. 288 с.
5. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 223 с.
6. Хейфец М.Л. Проектирование процессов комбинированной обработки. М.: Машиностроение, 2005. 272 с.
7. Менеджмент качества предприятий машиностроения / В.Н. Корешков, Н.А. Кусакин, Ж.А. Мрочек, М.Л. Хейфец. Минск: Экономика и право, 2003. 224 с.
8. Статистический анализ конструктивных элементов и технологических параметров деталей машин / М.Л. Хейфец, В.С. Точило, В.И. Семенов и др. Новополоцк: ПГУ, 2001. 112 с.

УДК 621.83:620.17

Е.В. Шеховцева (Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)

Исследование контактной усталости цилиндрических зубчатых колес

Представлена методика проведения экспериментальных исследований контактной усталости цилиндрических зубчатых колес.

Article presents method of experimental spur gears contact fatigue research.

Ключевые слова: экспериментальные исследования, контактная усталость, цилиндрическое зубчатое колесо.

Key words: experimental research, contact fatigue, spur gear.

Известны многочисленные случаи разрушения зубчатых колес в редукторах и коробках передач газотурбинных двигателей при напряжениях, не пре-

вышающих предела упругости. Предвестником разрушения являются мелкие трещины, появляющиеся в тех местах деталей, которые ослаблены концентраторами напряжений. Концентраторами напряжений в деталях являются переходы с одного размера на другой — профиль зуба. Получающееся при этом разрушение деталей носит название *усталостного*.

К зубу зубчатого колеса нагрузка прикладывается в течение небольшой части каждого оборота (на рабочем участке линии зацепления), затем сменяется периодом отдыха, продолжающимся до следующего входа зуба в зацепление (рис. 1). Таким образом, нагружение зубьев носит прерывистый характер. В этом смысле оно заметно отличается

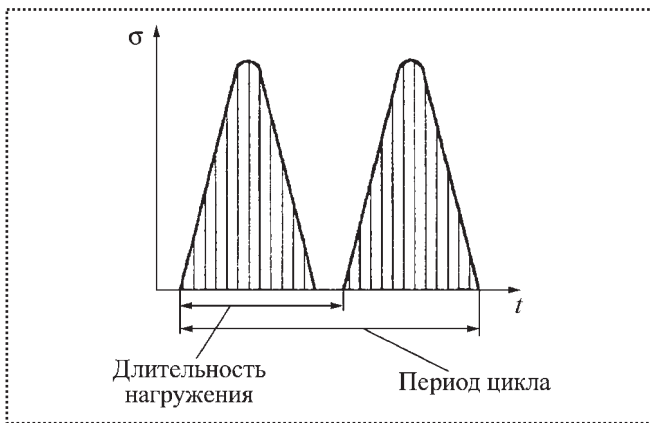


Рис. 1. Схема действия нагрузки на зубья

от синусоидального нагружения, обычно осуществляемого в машинах для испытания на усталость, приближаясь к нагружению на усталость.

При таком виде нагружения приходится принимать в расчет не статический предел прочности или статический предел упругости, а какую-то другую величину, которая не превысила бы реальное напряжение, возникающее в детали. Эта величина всегда ниже статического предела упругости. Ее определяют экспериментально.

Для моделирования реальных условий образцы при испытании на усталость подвергают действию переменных нагрузок. Испытания проводят при различных температурах, под воздействием различных сред и т.д.

Приложение нагрузок к испытываемому образцу или зубчатым колесам носит цилиндрический характер.

Циклом называется однократный процесс смены напряжения, проходящего непрерывный ряд значений, причем напряжение в начале цикла равно напряжению в конце цикла по величине и по знаку.

Для исследования контактной усталости цилиндрических зубчатых колес применяют специальные установки. При сравнении методов испытаний на зубчатых колесах и роликовой машине нетрудно заметить, что хотя испытания колес дают более достоверные результаты, они являются более сложными, дорогими, длительными, несвободными от существующих погрешностей, возникающих при изготовлении и сборке сопряжений.

Эти недостатки отсутствуют при применении **роликовой аналогии**. Испытания на роликовых образцах, рабочие поверхности которых перекатываются с одновременным скольжением, довольно точно

воспроизводят условия работы материала в контакте зубьев. При этом испытания на роликах позволяют значительно ускорить проведение экспериментов, производить более точную оценку контактных напряжений на рабочей поверхности, применять более дешевые и простые объекты испытаний при одновременно высокой точности их изготовления.

Ролики могут быть выполнены с различными диаметрами, что позволит ускорить разрушение ролика малого диаметра. Вследствие этого испытания роликов при качении со скольжением являются основными видами испытаний на контактную выносливость материалов для зубчатых колес, позволяющими более точно оценить влияние изучаемых факторов на несущую способность контактной поверхности.

Для лабораторных испытаний применяют двухпозиционные роликовые машины (рис. 2) с двухпарными нагружающими устройствами.

Такие устройства позволяют изучить механизм питтинга, оценить влияние смазочных и конструкционных материалов на его проявление, исследовать влияние термообработки, микрогеометрии и других параметров, влияющих на надежность зубчатых пар.

Такая роликовая аналогия зубчатой передачи в условиях современного развития научного приборостроения является незаменимым средством контроля качества новых видов материалов и механизма смазки.

Испытания на роликах позволяют значительно ускорить проведение экспериментов, производить более точную оценку контактных напряжений на рабочей поверхности, применять более дешевые и простые объекты испытаний при одновременно высокой точности их изготовления.

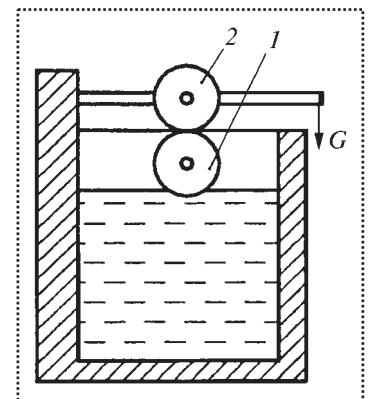


Рис. 2. Схема роликовой машины:

G — сила, обеспечивающая требуемое контактное давление; 1 — ролик; 2 — нагружающий нажимной ролик



Контактирование ролика 1 с нагружающим нажимным роликом 2 обеспечит более быстрое поверхностное разрушение за счет периодических силовых контактных взаимодействий. Ролики могут быть выполнены с различными диаметрами, что определяет более ускоренное разрушение ролика малого диаметра. Их рабочая поверхность выполняется цилиндрической или конической для имитирования работы соответственно прямозубых и косозубых зацеплений. Один из роликов связан с приводом вращения, а другой – с системой нагружения, обеспечивающей требуемые контактные давления в зоне касания тел качения.

Критерием разрушения при контактной усталости поверхностей зубьев являются повреждения, вызывающие усталостное, пластическое или хрупкое разрушение вдоль всей контактной линии. Это состояние зубчатой передачи характеризуется значительным нарушением ее кинематической точности и четко фиксируется по резкому росту динамической нагрузки в зацеплении, сопровождающемуся увеличением виброактивности передачи. Данный критерий не противоречит оценке работоспособности зубчатой передачи по виду выкрашивания, ограниченному (приработочному) или прогрессирующему.

Деталь первоначально осматривают визуально на наличие усталостных трещин на рабочих поверхностях. Затем дают количественную оценку контактной усталости зубчатого колеса или ролика. Количественную оценку контактной прочности исследуемого образца проводят по формулам, приведенным ниже.

Максимальные нормальные контактные напряжения, МПа, по линии контакта деталей с цилиндрической рабочей поверхностью определяют по следующей формуле [1]:

$$\sigma_{z \max} = 0,789 \sqrt{\frac{P(D_1 + D_2)}{l D_1 D_2 \left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)}}$$

где E_1, E_2, μ_1, μ_2 – соответственно модули упругости, МПа, и коэффициенты Пуассона для материалов контактирующих деталей;

P – нагрузка при контактировании деталей, Н;

l – длина линии контакта, м;

D_1, D_2 – диаметры соответственно ролика и диска (делительные диаметры зубчатых колес), м.

При исследовании зубчатых колес, изготовленных из одного материала, при $E_1 = E_2, \mu = 0,3$ формула выглядит следующим образом:

$$\sigma_{z \max} = 0,591 \sqrt{\frac{PE D_1 + D_2}{l D_1 D_2}},$$

где l, D_1, D_2 измеряют после испытания, м;

E_1, E_2, μ_1, μ_2 могут быть взяты из табличных данных справочной литературы.

В качестве результата работы должна получиться кривая усталости (рис. 3). При построении кривой усталости (см. рис. 3), которая является основной характеристикой выносливости материала, необходимо иметь не менее 10 одинаковых образцов. При этом каждый образец испытывают только при одной величине напряжений до разрушения или до заданного (базового) числа циклов. Один из образцов закрепляют в машину, дают напряжение σ_1 , заведомо превышающее предел выносливости (например, на 5 % ниже предела упругости), и определяют число N_1 циклов, при котором произойдет разрушение образца.

Затем испытывают второй образец при напряжении, меньшем σ_1 , и также определяют число циклов N_2 до разрушения. Аналогично поступают с остальными образцами. Например, если образец 7 не разрушился при напряжении σ_7 , выдержав число циклов $N_7 = 10^7$, то определяют, является ли напряжение σ_7 пределом выносливости. Если величина этого напряжения близка к σ_6 , то можно считать, что σ_7 является пределом выносливости. Если разность между σ_6 и σ_7 велика, то испытывают еще

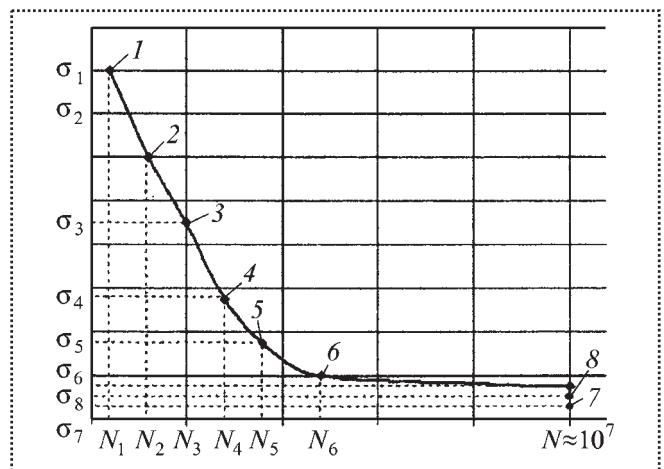


Рис. 3. Кривая усталости стали:
1–8 – номера образцов



один образец и нагружают его промежуточным напряжением σ_8 между σ_6 и σ_7 . Напряжение σ_8 будет близко к пределу выносливости.

Планируется проведение испытаний на контактную усталость на роликовой машине и двухступенчатой соосной установке соответственно на роликах и зубчатых колесах. Образцы будут изготовлены из материалов следующих марок: 20X3МВФ-Ш (ЭИ-415-Ш), 18X2Н4МА, 12X2НВФМА (ЭИ-712-Ш).

Виды термической обработки образцов и их параметры:

1) ионное азотирование на глубину $h = 0,2...0,55$ мм с твердостью, большей 85 HRN15, твердость сердцевины 321...388 НВ;

2) ионная цементация на глубину $h = 0,4...0,7$ мм с твердостью, большей 88 HRN15, твердость сердцевины 33...45 HRC.

Роликовая машина и установка обеспечат частоту вращения ведущего вала до 12 000 мин⁻¹ и нагрузку на образцах до 12 кН. Испытания будут проводиться с использованием синтетических термостойких масел МП-8, применяемых в авиационных зубчатых редукторах. Температура масла будет поддерживаться $\sim 120 \pm 5$ °С.

Библиографический список

1. Производство зубчатых колес газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин и др.; под ред. Ю.С. Елисеева. М.: Высшая школа, 2001. 493 с.

В.Н. Костюков, д-р техн. наук, С.Н. Бойченко, канд. техн. наук,
А.В. Костюков, канд. техн. наук, А.В. Молтенинов, Ю.В. Булучевский, С.Ю. Карпов,
Д.В. Двухжилов, А.В. Щелканов (Научно-производственный центр "ДИНАМИКА", г. Омск)

Стендовая система входной вибродиагностики подшипников качения

Рассмотрены проблемы эксплуатации подшипников на современных производствах. Приведено описание системы для входного контроля подшипников.

The problem of bearing on modern plants is considered. A system for input control bearings is described.

Ключевые слова: контроль и диагностика подшипников, подшипник, система контроля подшипников.

Key words: control and diagnosis of bearings, bearing, bearings control system.

Техническое состояние роторных машин во многом определяется состоянием их подшипниковых узлов. Многолетний опыт мониторинга технического состояния роторного оборудования показывает, что чуть менее 10 % подшипников дорабатывает до окончания предписанного срока службы, утвержденного в нормативных документах [1, 2].

Наряду с неправильной эксплуатацией подшипников, которая может быть сведена к минимуму использованием технических средств непрерывно-

го мониторинга, существует проблема технологических погрешностей подшипника при его производстве.

Контроль качества закупаемых подшипников становится еще более актуальной задачей в связи с появлением на рынке так называемых "серых" партий, где под маркой известного производителя скрывается подделка из некачественных материалов, произведенная в кустарных условиях, которая разваливается через несколько часов после установки на агрегат.

В связи с этим появляется необходимость проводить диагностику технического состояния подшипников при входном контроле, перед вводом подшипника в эксплуатацию. Но обеспечить входной контроль всех подшипников по стандартной методике согласно техническим условиям [3] измерением его геометрических характеристик – нерешаемая задача в условиях действующего производства.

Наиболее эффективный и действенный способ оценки состояния подшипника и прогнозирования его ресурса – это контроль его параметров вибрации.



Расчетный ресурс подшипников качения определяют выражением [4]

$$L_{10} = \left(\frac{C_r}{P_r} \right)^\alpha, \quad (1)$$

где C_r – расчетная грузоподъемность подшипника;

P_r – эквивалентная нагрузка;

α – коэффициент, определяемый типом подшипника: $\alpha = 3$ – для шариковых и $\alpha = 3,33$ – для роликовых подшипников.

Эквивалентную нагрузку определяют по двум факторам: статическая нагрузка P_c и динамическая нагрузка P_d :

$$P_r = P_c + P_d. \quad (2)$$

Если **статическую нагрузку определяют режимом работы машины** и она может изменяться в широких пределах, то **динамическую нагрузку определяют состоянием подшипника** – все шероховатости и дефекты тел и поверхностей качения приводят к увеличению динамических сил, действующих на подшипник, и в результате согласно выражению (1) уменьшают его ресурс. Причем это уменьшение ресурса может быть весьма значительным. Так, если для высокоточного подшипника, у которого динамической силой можно пренебречь по сравнению со статической ($P_c \gg P_d$), расчетный ресурс равен L , то для подшипника с погрешностями изготовления, когда статическая и динамическая силы соизмеримы ($P_c \approx P_d$), расчетный ресурс L_d значительно снижается:

$$L_d = L / (1 + P_d / P_c)^\alpha. \quad (3)$$

В частности, при $P_c = P_d$ ресурс падает в 8 раз для шариковых подшипников и в 10 раз для роликовых. Это объясняет необходимость входной вибродиагностики качества подшипников качения перед установкой их на ремонтируемые или вновь изготавливаемые машины. Вибродиагностика позволяет также надежно отбраковать подшипники с увеличенным радиальным зазором и/или "осевой игрой", являясь высокопроизводительным средством контроля по сравнению с традиционным подходом.

В качестве иллюстрации влияния динамических сил на рис. 1 приведен график зависимости параметра вибрации V_S (общего уровня виброскорости)

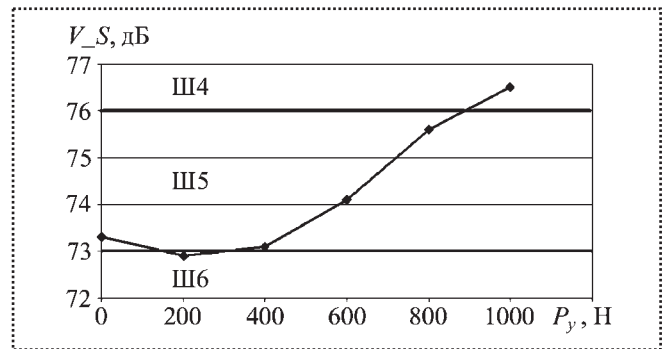


Рис. 1. Зависимость уровня вибрации V_S подшипника 62310 от величины приложенной нагрузки P_y ; Ш4...Ш6 – вибронный класс подшипника

сти) подшипника 62310 от величины приложенной радиальной статической нагрузки P_y .

Приведенная зависимость была получена при испытании подшипника на системе КОМПАКС®-РПП при изменении радиальной нагрузки в пределах 0...1000 Н.

При начальном увеличении нагрузки происходит некоторое уменьшение динамических сил из-за выборки зазоров в местах контактов тел качения, что приводит к уменьшению уровня вибрации. При дальнейшем увеличении нагрузки динамические силы увеличиваются из-за увеличения влияния неровностей поверхностей качения, что приводит к росту уровня вибраций.

Сравнивая приведенные данные с нормами вибраций данного подшипника различного класса точности (роликовый радиальный с диаметром отверстия 50 мм) [5], можно отметить, что до нагрузки 900 Н подшипник можно отнести к вибронному классу Ш5. При значении радиальной нагрузки 200 Н подшипник даже переходит в класс Ш6. При значении нагрузки больше 900 Н подшипник переходит в класс Ш4. Согласно [6] величина нагрузки при испытании подшипника данного типа должна составлять 400 Н, при этом он будет относиться к классу Ш5.

Из приведенных данных видно, что, измеряя параметры вибрации подшипника, можно судить о величине динамических сил, действующих на подшипник, и, следовательно, можно оценивать его потенциальный ресурс более точно.

Решением задачи проведения 100 % контроля закупаемых подшипников является использование вибродиагностических методов, где путем анализа сигнала вибрации можно оперативно дать заклю-



чение о состоянии подшипника без его разборки и микрообмера. Для решения этой задачи и была разработана стендовая система КОМПАКС®-РПП.

Система стендовая КОМПАКС®-РПП является проектно комплектуемым вариантом исполнения системы КОМПАКС® и предназначена для объективной оценки технического состояния подшипников качения и диагностики погрешностей изготовления дорожек колец, тел качения и сепаратора, влияющих на ресурс.

Внешний вид системы КОМПАКС®-РПП приведен на рис. 2 (см. 3-ю стр. обложки).

Диагностика состояния подшипников производится по параметрам виброскорости и виброускорения в полосах частот 50...300, 300...1800 и 1800...10 000 Гц.

Информацию о техническом состоянии испытываемого подшипника персонал получает на экране монитора. Это светофорные пиктограммы (зеленый цвет – норма, желтый – требует принятия мер, красный – недопустимо) и столбиковые диаграммы значений и состояний диагностических признаков по каждому из выбранных субъектов диагностики.

Продление срока службы подшипников обеспечивается сортировка результатов вибродиагностики и разделение на *три группы применения в эксплуатации по частоте вращения*:

- I группа – испытанный подшипник применяется на агрегатах с частотой вращения до 3000 об/мин и более;
- II группа – не более 1500 об/мин;
- III группа – не более 1000 об/мин.

Преимуществами системы являются:

- ◆ вибродиагностика подшипника по параметрам виброускорения и виброскорости в различных полосах частот в соответствии с [4–7];
- ◆ встроенная автоматическая экспертная система диагностики дефектов;
- ◆ полная совместимость с системой компьютерного мониторинга КОМПАКС® [2];
- ◆ полный временной и спектральный анализы вибросигналов;
- ◆ печать и архивирование протокола испытаний;
- ◆ простота обслуживания и встроенная система самоконтроля;
- ◆ рекомендации по использованию подшипника в целях продления срока службы.

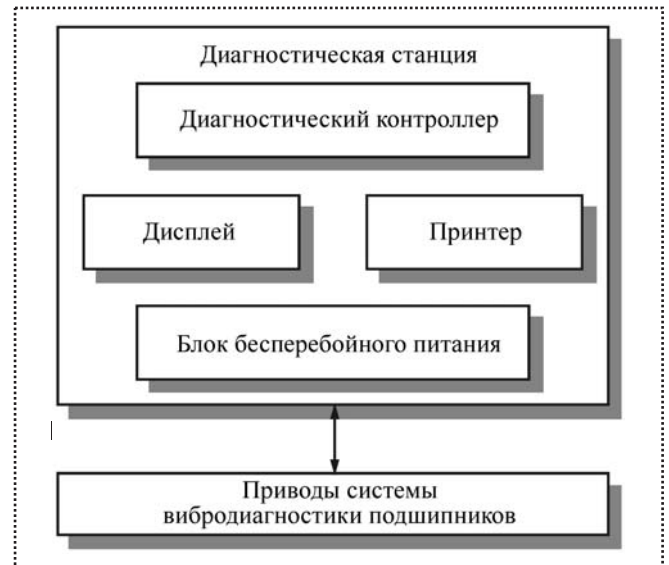


Рис. 3. Структура стендовой системы КОМПАКС® – РПП

Структура стендовой системы приведена на рис. 3.

Система КОМПАКС®-РПП включает в себя:

- диагностическую станцию на базе промышленного контроллера со схемой автоматического управления приводом системы;
- дисплей, принтер, блок бесперебойного питания;
- встроенный пакет программ, обеспечивающий автоматическую вибродиагностику подшипников, архивирование и распечатку результатов;
- привод 1602 вибродиагностики подшипников обеспечивает вращение внутреннего кольца подшипника при неподвижном наружном кольце; создает осевую и радиальную нагрузку в целях вибродиагностики подшипников с внутренними диаметрами 40...120 мм и наружным диаметром до 320 мм; комплектуется 16 оправками (рис. 4, см. 3-ю стр. обложки);
- искровой маркер, индикатор намагниченности.

Для представления различных видов информации на экране диагностической станции предусмотрены следующие режимы работы (экраны):

- ◆ **МОНИТОР** – отображение информации о состоянии подшипника;
- ◆ **АНАЛИЗ** – анализ спектра сигнала, поступающего с вибропреобразователя;
- ◆ **СИСТЕМА** – отображение информации встроенной системы самоконтроля;



◆ **ОСЦИЛЛОГРАФ** – анализ формы сигналов и настройки системы;

◆ **АРХИВ** – поиск, просмотр и печать актов испытаний подшипников.

Программное обеспечение позволяет использовать для стендовой системы не только различные экраны, диагностические параметры и другие системные функции, но дополнительно легко реализуется система подготовки отчетов, а также дополнительные элементы контроля и управления для автоматизации процесса оценки состояния подшипников [1].

Привод 1602 имеет следующие конструктивные особенности:

- в целях снижения собственных шумов привода электродвигатель установлен на виброизолирующей платформе, состоящей из трех плит, различных по скорости распространения колебаний. Сам электродвигатель односкоростной с регулировкой частоты вращения вала с помощью частотно-регулируемого преобразователя;
- частоту вращения обеспечивают в диапазоне 30...3000 об/мин против ранее имевшегося двухскоростного фиксированного режима 750/1500 об/мин;
- применена муфта с виброизолирующей проставкой, позволяющей компенсировать несоосность валов двигателя и шпинделя до 0,2 мм и снижать шумы, передаваемые от вала двигателя к шпиндельной бабке;
- в шпиндельной бабке применены подшипники скольжения с маслоподводящими лабиринтами, позволяющими снизить температуру при максимальных нагрузках и повысить допустимую частоту вращения до 3000 об/мин;
- в корпусе устройства радиального нагружения применена последовательная установка датчика силы, позволяющая контролировать силу прижатия корпуса измерительной насадки к наружному кольцу подшипника (радиальная нагрузка) с точностью до 5 Н в диапазоне 30...2000 Н;
- в устройстве осевого нагружения также используют датчик силы с точностью установки осевой нагрузки 5 Н в диапазоне 200...2000 Н;
- радиальную и осевую нагрузки визуально контролируют на мониторе пульта оператора;
- в устройстве радиального нагружения использована насадка, обеспечивающая передачу упругих колебаний от наружного кольца подшипни-

ка на пьезоэлектрический преобразователь с минимальным искажением сигнала вследствие отсутствия контакта чувствительного элемента с корпусом насадки;

- привод установлен на виброизолирующие опоры.

Система КОМПАКС®-РПП может комплектоваться приводом 1608 для диагностирования подшипников с внутренним диаметром 7...35 мм; приводом 1607 для диагностирования подшипников с внутренним диаметром 130...300 мм.

За время работы в области вибродиагностики стендовые системы разработаны и внедрены в производство на более чем 25 предприятиях различных отраслей народного хозяйства. Пользователи положительно отзываются о работающих системах КОМПАКС®-РПП, что говорит об удобстве и качестве диагностики.

Статистические показатели виброактивности подшипников рассмотрим на опыте работы в этом направлении ОАО "Уралкалий" (г. Березники), где за период с ноября 2004 г. по ноябрь 2006 г. было продиагностировано более 46 000 подшипников. По результатам вибродиагностики система отсортировала подшипники на три группы применения в эксплуатации: к I группе было отнесено 75 %, к II группе – 3 %, к III группе – 22 % всех подшипников.

Распределение дефектов подшипников, обусловленных недопустимой шероховатостью поверхностей качения, приведено на рис. 5 (см. 3-ю стр. обложки).

Обнаруженные дефекты распределены следующим образом:

- дефекты, связанные с внешним кольцом подшипника, – 10,9 %;
- дефекты, связанные с внутренним кольцом подшипника, – 79,9 %;
- дефекты, связанные с телами качения подшипника, – 8,8 %;
- дефекты, связанные с сепаратором подшипника, – 0,5 %.

Из приведенных данных видно, что доля подшипников, поступающих на предприятие в неудовлетворительном состоянии, снижается. Так, относительное число подшипников, находящихся в состоянии "НЕДОПУСТИМО" (НДП), снизилось с 60 до 10...15 %, в то время как доля подшипников в

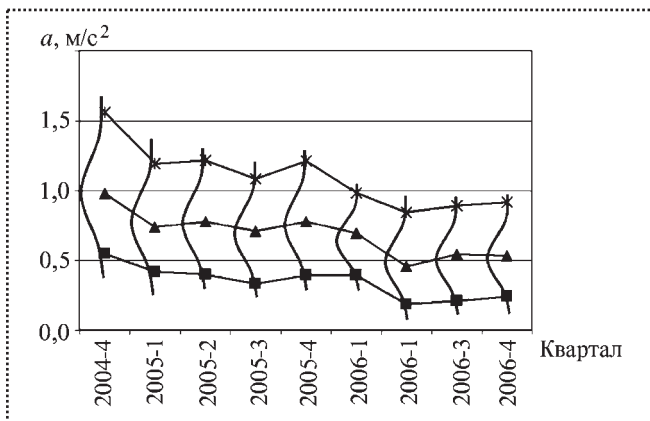


Рис. 6. Изменение статистических параметров распределения относительного уровня виброускорения a подшипников от времени эксплуатации системы КОМПАКС®-РПП^
—■— значение процентиля 20; —▲— медиана; —*— значение процентиля 80

состоянии "ДОПУСТИМО" увеличилась с 7 до 40...49 %. Соответственно виброактивность поступающих подшипников также уменьшилась по мере работы потребителя с поставщиком со временем эксплуатации системы.

На рис. 6 приведены графики изменения распределения уровня виброускорения, приведенного к порогу НДП, что позволяет оценить изменение относительного уровня вибраций. На рис. 6 представлены вид и параметры распределений (медиана, значения процентилей 20 и 80) поквартально за период с начала внедрения до конца 2006 г. Так, среднее значение приведенного виброускорения за два года эксплуатации систем уменьшилось более чем в два раза.

Графики положительно характеризуют работу потребителей по повышению качества выпускаемого и ремонтируемого оборудования, которые, благодаря работе системы, вынуждают изготовителей и поставщиков подшипников приводить каче-

ство продукции в соответствие с требуемыми нормативами и ГОСТами. Число подшипников в неудовлетворительном состоянии уменьшается, так как они не пропускаются системой в эксплуатацию и возвращаются изготовителю.

Вывод

Внедрение стендовых систем КОМПАКС®-РПП в производство позволяет организовать на предприятии технологический процесс входного контроля подшипников, что помогает отбирать в эксплуатацию подшипники с большим ресурсом, а некачественные подшипники возвращать изготовителю.

Использование стендовых систем КОМПАКС®-РПП повышает достоверность и объективность оценки технического состояния подшипников качения, улучшает качество ремонта и надежность оборудования, повышает культуру производства и обеспечивает выпуск в эксплуатацию "невибрирующего" оборудования с минимальными погрешностями и максимальным потенциальным ресурсом.

Библиографический список

1. Костюков В.Н. Мониторинг безопасности производства. М.: Машиностроение, 2002. 224 с.
2. Костюков В.Н., Бойченко С.Н., Костюков А.В. Автоматизированные системы управления безопасной ресурсосберегающей эксплуатацией оборудования нефтеперерабатывающих и нефтехимических производств (АСУ БЭР – КОМПАКС®) / под ред. В.Н. Костюкова. М.: Машиностроение, 1999. 163 с.
3. ГОСТ 520–2002. Подшипники качения. Общие технические условия.
4. ГОСТ 18855–94. Подшипники качения. Динамическая расчетная грузоподъемность и расчетный ресурс (долговечность).
5. РД ВНИПП.038–04. Подшипники качения. Нормы вибрации. Руководящий документ.
6. МВИ ВНИПП.002–04. Подшипники качения. Вибрация. Методика выполнения измерений.
7. ГОСТ Р 52545.1–2006 (ИСО 15242–1:2004). Подшипники качения. Методы измерения вибрации. Основные положения.



А.В. Ланщикова, д-р техн. наук, **А.А. Селиверстов**
(Пензенская государственная технологическая академия)

Диагностическое обеспечение операций сборки резьбовых соединений

Показаны технологические возможности контрольно-диагностических стендов для использования на стадии подготовки сборочных операций в целях повышения качества сборки резьбовых узлов.

The paper shows the manufacturing capability of control and diagnostic test benches for using at the stage of preparation for assembly for the purpose of threaded unit assembly upgrading.

Ключевые слова: сборка, резьбовое соединение, контрольно-диагностические стенды.

Key words: assembly, threaded joint, control and diagnostic test benches.

В современных конструкциях машин должное внимание следует уделять вопросам их надежной работы в самых неблагоприятных условиях. Резьбовые соединения являются одним из наиболее распространенных средств сопряжений, поэтому обеспечение их надежности является актуальным из-за возможного преждевременного усталостного разрушения или самоотвинчивания в процессе эксплуатации.

Ослабление резьбовых соединений может быть двух видов: с взаимным вращением болта и гайки и без вращения. Разгрузка резьбового соединения происходит в результате относительных перемещений и касательных контактных деформаций между боковыми поверхностями витков резьбы, а также между стягиваемыми изделиями и крепежными деталями. Ослабление может также наступить в результате выравнивания неровностей и шероховатостей поверхности, уменьшения толщины прокладок, усадки поверхности детали под головкой болта или гайки. Причинами ослабления, в частности, являются влияние температуры, при которой работает соединение, и влияние различных температурных коэффициентов расширения материалов сопрягаемых деталей и резьбовых элементов [1, 2].

По характеру воздействия силовых нагрузок, вызывающих ослабление, их разделяют на нагрузки:

- статические;
- динамические безударные;
- ударные.

Основными мероприятиями по снижению нагрузки на стыки являются [1, 2]:

- ◆ увеличение силы затяжки резьбового соединения и ее точности;
- ◆ применение различных стопорящих устройств и элементов;
- ◆ снижение шероховатости контактирующих поверхностей;
- ◆ уменьшение диаметра отверстия под болт и т.д.

Многие вопросы по обеспечению надежности резьбовых узлов возможно решить еще на стадии сборки за счет более тщательного выполнения этапов технологической подготовки и непосредственного выполнения сборочных операций. В частности, обеспечение качества сборки (затяжки) резьбового соединения за счет уменьшения разброса контролируемого параметра также будет способствовать снижению явления ослабления.

Одним из решений проблемы качества резьбосборочных операций является более эффективное использование средств контроля и диагностирования на стадии подготовки резьбосборочных операций.

При подготовке сборочных операций для контроля чаще всего применяют средства, в основу которых заложен принцип измерений прикладываемого крутящего момента: это динамометрические и предельные ключи, резьбовые динамометры и т.д. Однако их технологические возможности недостаточны для оценки всей "картины" физики процесса нагружения резьбовых соединений. Наиболее достоверные результаты получают при учете одновременно всех параметров затяжки резьбовых соединений [3].

Для этого пригодны конструкции контрольно-диагностических стендов, позволяющие проследить одновременно все используемые при за-

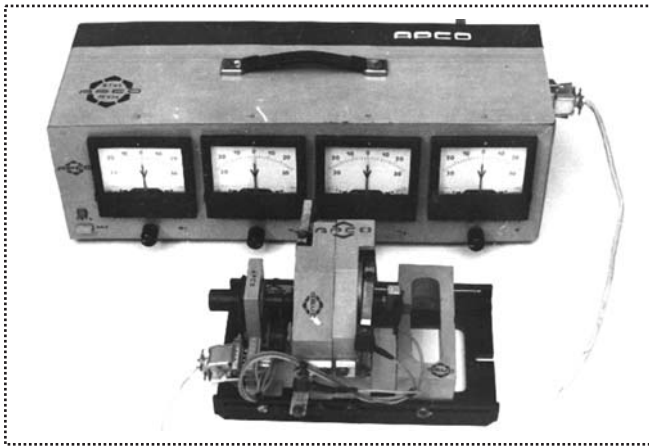


Рис. 1. Контрольно-тарировочный стенд (модель КТС-03)

тяжке резьбовых соединений параметры нагружения: крутящий момент, угол поворота и удлинение болта, а также устанавливать временную взаимосвязь между ними.

На рис. 1 представлен контрольно-тарировочный стенд, созданный в Пензенской государственной технологической академии, позволяющий решать указанные задачи.

Компоновка стенда включает два блока: силовой и измерительный.

В *силовом блоке* имеются узлы разделения прикладываемого крутящего момента на моменты в резьбе и под головкой испытываемого болта, а также узлы измерений угла поворота и удлинения болта.

В *измерительном блоке* размещены показывающие приборы (вольтметры, проградуированные в соответствующих единицах измерений), блок питания усилителей сигнала с тензодатчиков, установленных в силовом блоке.

Как показала практика использования стенда, для расширения его технологических возможностей было бы полезным воспроизвести и имитацию первоначальной стадии эксплуатации только что затянутого резьбового узла, так как именно для нее характерно наиболее интенсивное ослабление стыка (смятие микронеровностей по контактирующим поверхностям).

В специализированном КБ "Автоматизации и роботизации сборочных операций" (АРСО) Пензенской государственной технологической академии, одним из направлений исследований которого является диагностическое обеспечение резьбосборочных операций, был создан более совершен-

ный вариант контрольно-диагностического стенда (рис. 2).

В общем случае технологические возможности стенда позволяют диагностировать резьбовые соединения на предмет использования процента текучести более "мягкого" элемента резьбового соединения, настраивать и диагностировать гайковерты по любому из известных контролируемых параметров, а также имитировать первоначальную стадию эксплуатации затянутого резьбового узла [4].

Перед использованием устройства установочную плиту 1 закрепляют на рабочем столе в горизонтальной плоскости. Испытываемый болт пропускают через отверстия втулок 2, вводят в зацеп-

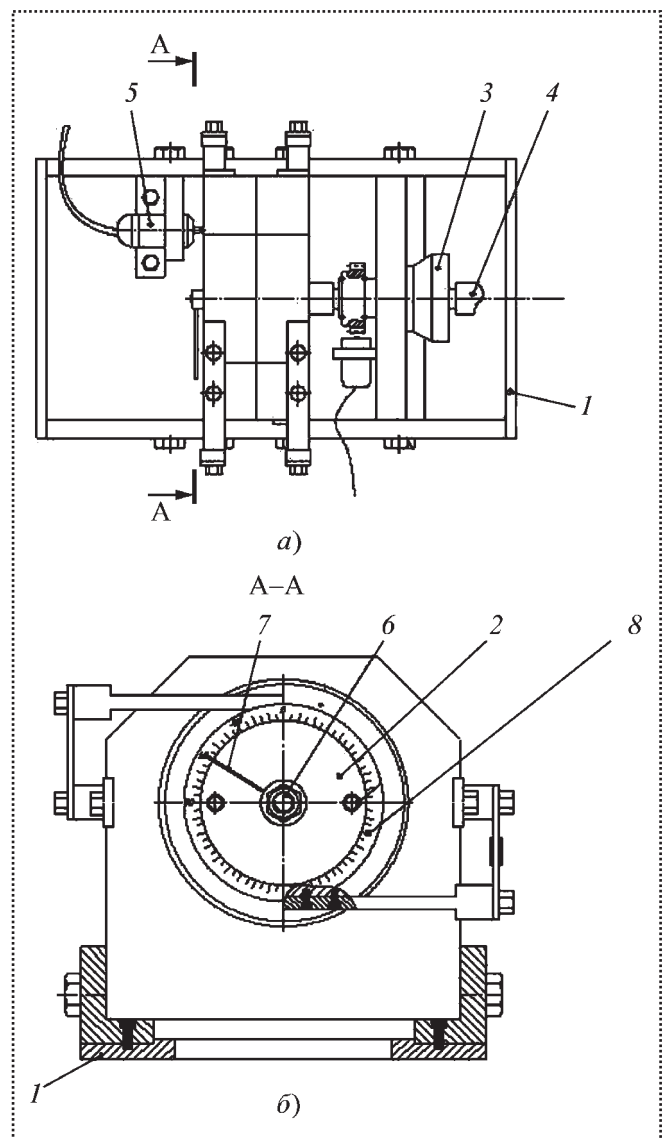


Рис. 2. Схема диагностического стенда



ление с накидным ключом, а на резьбовую часть навинчивают до упора гайку 6. В отверстие вала 3 устанавливают хвостовик гайковерта (стакан) 4 или динамометрического ключа в зависимости от выбранного режима работы.

Стенд может быть использован в трех режимах.

1. *Режим испытаний резьбовых соединений (статический).*

От динамометрического ключа крутящий момент через стакан 4 передается на промежуточный вал 3 и накидной ключ. При этом выполняется затяжка резьбового соединения. Достигнутые параметры затяжки резьбового соединения (крутящий момент, угол поворота и удлинение болта) регистрируются с помощью тензодатчиков и передаются в измерительный блок.

2. *Режим настройки гайковертов (динамический).*

Стакан 4 гайковерта соединяют с промежуточным валом 3 и включают привод последнего. Кроме вышеприведенных параметров затяжки (для первого режима работы) за счет использования электросекундомера регистрируется и временная взаимосвязь между всеми контролируемыми параметрами. При необходимости производят регулировку мощности (развиваемого крутящего момента) гайковерта.

Если есть необходимость измерений фактической частоты вращения шпинделя испытываемого гайковерта, тогда включают индукционный датчик, связанный с тахометром.

3. *Режим имитации эксплуатационных нагрузок.*

Для оценки степени ослабления резьбового стыка за какой-либо промежуток времени, после

завершения затяжки болта к резьбовому узлу прикладывают возможную эксплуатационную нагрузку. Для этого включают пневмомолоток 5, создающий вибрационные колебания, и в результате воздействия ударника молотка на втулку 2 происходит передача колебаний на резьбовой стык.

Через некоторое время происходит самоотвинчивание гайки 6, о величине которого судят по изменению угла поворота указателя 7 относительно шкалы 8, проградуированной в градусах.

Вывод

Таким образом, применение подобных диагностических стендов позволяет повысить качество выполнения операций сборки резьбовых соединений за счет более тщательного выполнения стадии подготовки производства, а также моделирования поведения резьбового узла в начальной стадии эксплуатации.

Стенд пригоден для использования в диапазоне метрических резьб М6–М42, для гайковертов статического действия любой мощности.

Библиографический список

1. **Сборка** и монтаж изделий машиностроения: Справочник в 2-х т. / под ред. В.С. Корсакова и В.К. Замятина. М.: Машиностроение, 1983. 480 с.
2. **Затяжка** и стопорение резьбовых соединений: Справочник / Г.Б. Иосилевич, Г.Б. Строганов, Ю.В. Шарловский. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.
3. **Ланшиков А.В., Моисеев В.Б.** Технология и оборудование автоматизированной сборки резьбовых соединений: Монография. Пенза: Пенз. гос. ун-т, 1999. 260 с.
4. **Положительное** решение ФИПС от 20.03.08 г. о выдаче патента РФ по заявке № 2006139224/28 (042770) "Контрольно-диагностический стенд" (МКП – G 01 L5/24, G 01 M 7/04/), авторы: А.В. Ланшиков, В.Б. Моисеев, В.В. Волков, А.А. Селиверстов.

**Не забудьте
оформить подписку на журнал
"Сборка в машиностроении, приборостроении"
на 2-е полугодие 2009 г.**

Индексы по каталогам

"Роспечать" – 79748,

"Пресса России" – 84967,

"Почта России" – 60257.

В.А. Шабайкович, д-р техн. наук (Жешувский технологический университет, Польша)

Опережающая оценка качества и конкурентоспособности изделий при гибкой автоматической сборке*

Изложены методы определения предварительной оценки качества и конкурентоспособности изделий, которые запускаются в гибком производстве. Рассмотрено влияние различных факторов гибкого производства: производственных затрат, показателей качества, стоимости эксплуатации и рыночной стоимости, управления и маркетинга. Проанализирован механизм формирования конкурентоспособности изделий.

The methods of passing ahead determination of competitiveness products which are started in production are described as degree of influencing different factors of expenses, indexes of quality, cost of exploitation and market price, management and marketing. The mechanism of forming competitiveness of products is analysed.

Ключевые слова: качество, конкурентоспособность, гибкая автоматическая сборка.

Key words: quality, competitiveness, flexible system transfer assembly.

Конкурентоспособность является свойством объекта (изделия, услуги, процесса или производства), которое характеризует степень реального или потенциального удовлетворения им конкретной потребности сравнительно с аналогичными объектами на определенном рынке и оценивают интегральной величиной, описывающей привлекательность изделий для потребителя и прибыльность для производителя. Безусловно, в производстве должна всегда обеспечиваться конкурентоспособность продукции, иначе в конечном итоге будет банкротство.

Необходимо заметить, что каждое изделие в нужном количестве и качестве может быть изготовлено в производстве с разной эффективностью. Но даже при приемлемых производственных, но больших эксплуатационных затратах или высокой себестоимости конкурентоспособность изделий стано-

* Материалы международного научного симпозиума "Современные технологии сборки". МГТУ "МАМИ". 2008.

вится сомнительной. Поэтому опережающая оценка конкурентоспособности намеченных к разработке и внедрению в производство технологических, конструкционных и организационных объектов является чрезвычайно важной: уже на проектной стадии технической подготовки производства можно выбрать наилучший вариант решения и не допустить изготовления неконкурентоспособных изделий [1].

На уровень конкурентоспособности по-разному влияют различные факторы (рис. 1). Превалирующее значение имеют затраты обеспечения качества изделия, его изготовления и внепроизводственные затраты и цена. При этом должно учитываться влияние менеджмента и маркетинга как процессов планирования и осуществления разработки, установления цены, продвижения и распределения идей, изделий и услуг для создания ситуаций обмена, которые удовлетворяют целям людей и организаций.

Маркетинг является одной из составляющих менеджмента наряду с такими, как производство, исследование, разработка, финансы, человеческие ресурсы, информационные системы и другие. К примеру, роль менеджера изделия состоит в координировании маркетинговых усилий по отношению к связанным между собой изделиям в пределах одной ассортиментной группы. При этом в целях конкретизации лучше рассматривать маркетинг в

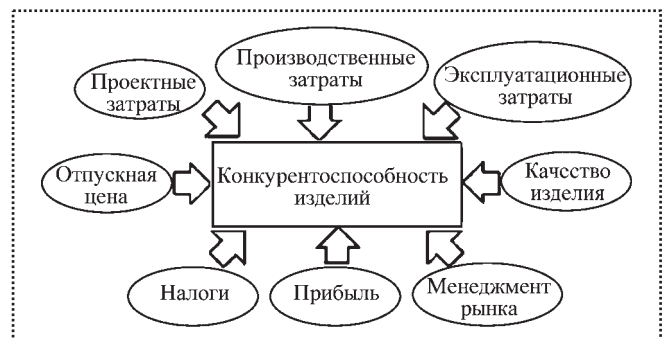


Рис. 1. Факторы, влияющие на конкурентоспособность



пределах одной организации, т.е. микромаркетинг [2, 3].

Внешними факторами повышения конкурентоспособности изделий, в общем, являются:

■ уровни конкурентоспособности страны, отрасли, региона, предприятия;

■ сила конкуренции на входе и выходе системы среди изделий-заменителей;

■ появление новых потребностей;

■ уровень организации производства, работы и управления у посредников и потребителей изделий;

■ активность контрактных аудиторий;

■ активная государственная поддержка науки и инновационной деятельности малого и среднего бизнеса;

■ стабильность политической и правовой системы;

■ высокая культура бизнеса;

■ открытость и гармоничность рынков;

■ гибкость финансовой системы;

■ низкая инфляция;

■ соответствие системы стандартизации и сертификации международной системе;

■ высокое качество информационного обеспечения;

■ наличие доступных и дешевых ресурсов;

■ низкие налоговые и таможенные ставки;

■ высокий уровень интеграции;

■ качественная система подготовки и переподготовки управленческих кадров;

■ высокий уровень конкуренции во всех сферах деятельности;

■ высокое качество инфраструктуры рынков;

■ значительный удельный вес конкурентоспособных организаций и изделий в отрасли.

К внутренним общим факторам влияния на конкурентоспособность изделий можно отнести:

◆ значительную потребность в изделиях;

◆ патентоспособность конструкций изделий;

◆ оптимальный уровень унификации и стандартизации;

◆ концентрацию, специализацию и кооперирование в отрасли;

◆ качественную информационную и нормативно-методическую базу управления в отрасли;

◆ эффективность организационной и производственной структур системы;

◆ конкурентоспособность персонала системы;

◆ конкурентоспособность поставщиков;

◆ функционирование системы обеспечения конкурентоспособности;

◆ сертификацию продукции и систем;

◆ эксклюзивность изделий;

◆ прогрессивность информационных технологий;

◆ прогрессивность технологических процессов и оборудования;

◆ научный уровень системы управления;

◆ обоснование миссии предприятия [4].

Факторы, определяющие уровень конкурентоспособности (рис. 2), показывают, что они в основном состоят из конструкционных, производственных и эксплуатационных затрат обеспечения качества при явном влиянии рыночных. Будут важны и потребность в изделии, время и условия поставки, послепродажный сервис, прибыль и даже реклама. Каждый из указанных факторов вносит свою большую или меньшую лепту в уровень конкурентоспособности. Задача состоит в том, чтобы правильно определить влияние факторов формирования и научиться управлять ими.

Механизм формирования конкурентоспособности изделий (рис. 3) предусматривает определение и степень влияния внешних и внутренних факторов при их изготовлении, продаже и эксплуатации, которые условно объединены в семь групп. К **внутренним факторам** относятся затраты, связанные с изготовлением изделий на конструкционном, технологическом и производственном уровнях, что соответствует цепочке конструкция – технология – изготовление. Известно, что сама конструкция изделия является основой его конкурентоспособности: еще ни одно малокачественное и трудноизготавливаемое изделие не было конкурентоспособным. При этом главным является то, что такой механизм базируется на применении концепции виртуальной разработки, изготовления и эксплуатации изделия, т.е. предварительного моделирования этих процессов на компьютере и получения виртуальных конструкции, технологии и эксплуатации и на этом основании – опережающей оценки конку-

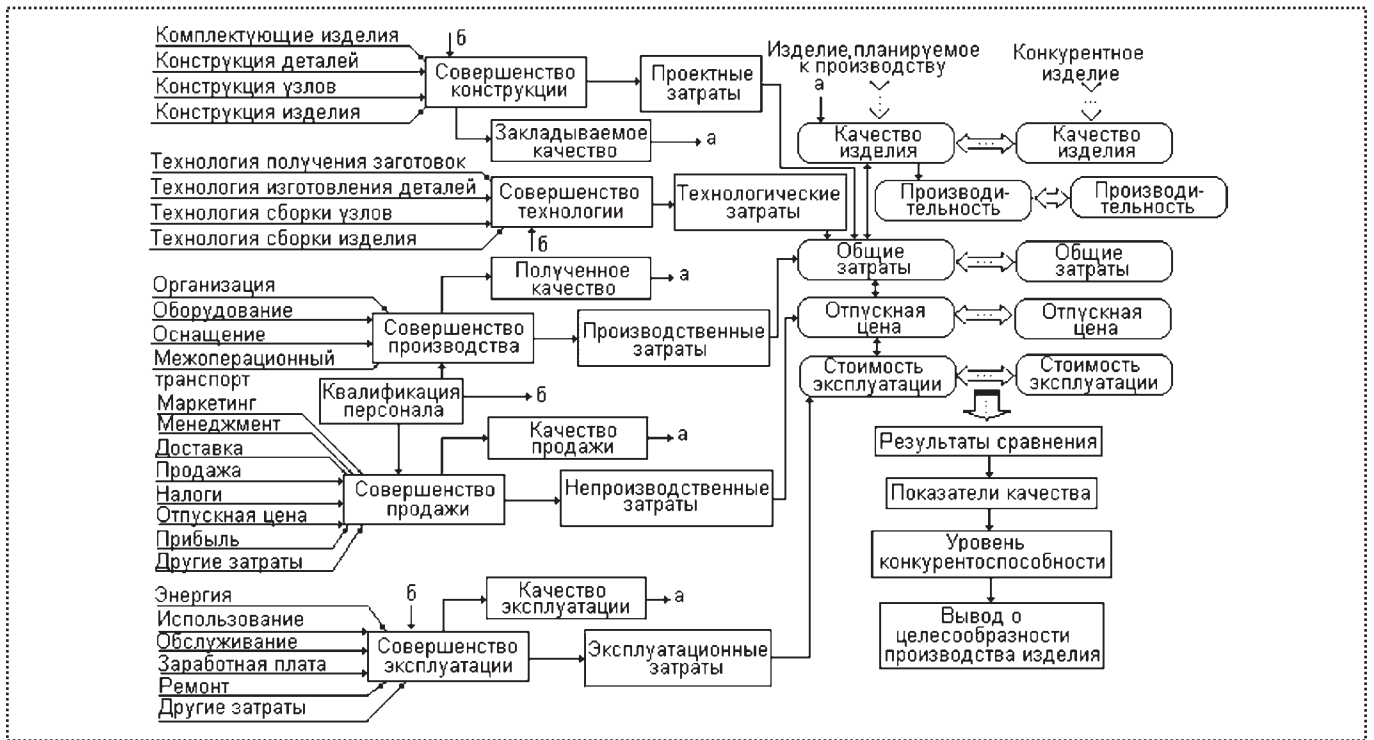


Рис. 2. Факторы, определяющие качество и конкурентоспособность изделий

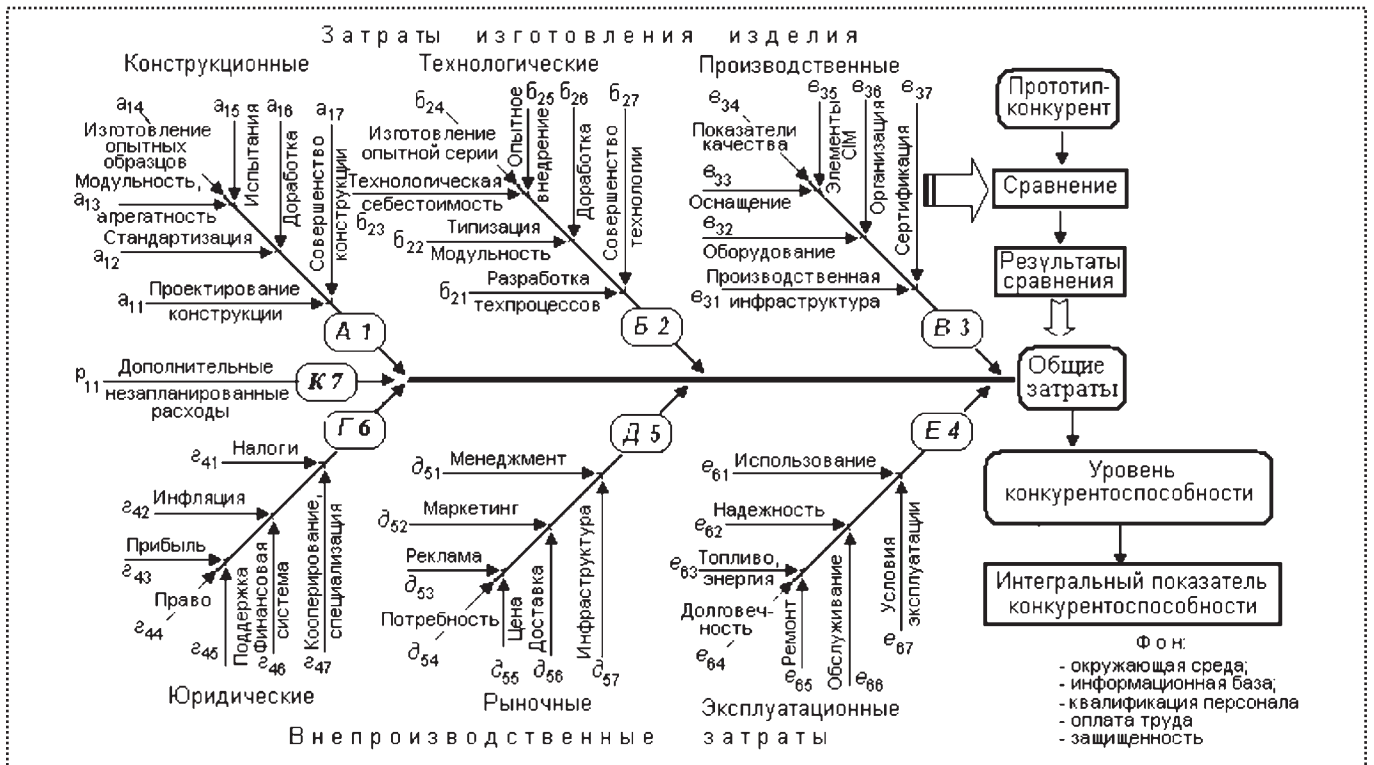


Рис. 3. Механизм формирования конкурентоспособности изделий



рентоспособности. В случае положительных результатов при дальнейшей уже реальной разработке можно еще более повысить как показатели качества, так и уровень конкурентоспособности изделия.

Конструкционные затраты многочисленны, однако можно выделить семь основных. Проектирование конструкции изделия желательно проводить автоматически или автоматизированно: в программе проектирования уже заложена современная методика получения высокоэффективной конструкции. При проектировании особенно важно закладывать экстремальные условия эксплуатации изделия.

При ручном проектировании важными будут использование современной методики проектирования конструкций, заложение принципов агрегатности и модульности, стандартизации и т.п., что потребует определенных затрат. Но решающее значение будут иметь затраты, связанные с обеспечением высокого качества конструкции изделия, изготовления опытных образцов, их тщательного испытания и соответствующей доработки конструкции по полученным результатам. Совершенство конструкции изделий оценивают как по полученным показателям качества, так и предполагаемым затратам его изготовления по сравнению с прототипом-конкурентом.

Подобные подходы должны применяться и при *разработке технологического процесса* изготовления изделия. Это предусматривает использование современной методики проектирования, автоматической разработки, заложение принципов CALS-технологий, но особенно опробование разработанной технологии как при компьютерной ее реализации, так и при изготовлении опытной серии изделий, опытным внедрении, соответствующей доработке технологических процессов.

Совершенство технологии оценивается ее эффективностью, стабильностью, а в общем случае — показателями качества процесса и текущими затратами. Весьма важны технологическая себестоимость, опытное внедрение и доработка по полученным результатам.

Производственные затраты в основном определяются совершенством технологии, производственной инфраструктуры, наличием оборудования и оснащения, технологическим обеспечени-

ем заложенных в конструкцию изделий показателей качества, широким использованием элементов компьютерно-интегрированного производства СИМ, организацией и сертификацией. Чем производство будет более приближаться к компьютерно-интегрированному, тем меньшими будут такие затраты.

Эксплуатационные затраты связаны с расходом топлива или энергии при работе, надежностью в работе, физической и моральной долговечностью, обслуживанием и ремонтом, а также условиями эксплуатации.

Рыночные затраты зависят от инфраструктуры рынка, отпускной цены изделия, доставки, менеджмента, маркетинга, рекламы, но главное — потребности в изделии, качества и его цены. И, наконец, затраты, зависящие от *юридических факторов*. В первую очередь это уровень права, которое регулирует эти вопросы, состояние финансовой системы, уровень специализации и кооперирования, налоги, прибыль, а также уровень коррупции. Следует также учитывать непредусмотренные расходы, связанные с каждой из групп затрат. Они возникают от неточности проводимых расчетов, а также вынужденных непредвиденных дополнительных оплат и при коррупции, например взятки.

Приведенный общий механизм формирования конкурентоспособности изделий может быть представлен графом (рис. 4), на котором действующие факторы показаны вершинами графа, а линиями — их влияние на конкурентоспособность. На основании принципа суперпозиции каждая из переменных, которая влияет на уровни конкурентоспособности, может быть представлена их линейной комбинацией и в общем виде быть записана матричным уравнением $Y = KX$ или в развернутой форме [5]

$$\begin{pmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \cdot \\ Y_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \dots & k_{1mn} \\ k_{21} & k_{22} & \dots & k_{2mn} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ k_{m1} & k_{m2} & \dots & k_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \cdot \\ X_m \end{pmatrix}, \quad (1)$$

где k_{mn} — передаточные коэффициенты влияния входных переменных на уровень конкурентоспособности, т.е. коэффициенты корреляции.

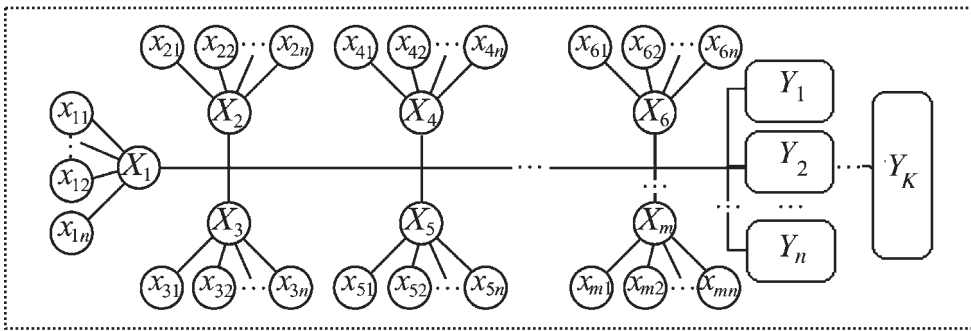


Рис. 4. Граф механизма формирования конкурентоспособности изделий:

$x_{j,i}$ – формирующие факторы; X_j – групповой формирующий фактор; Y_i – отдельные уровни конкурентоспособности; Y_k – уровень конкурентоспособности; $i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, m$

Считается, что эта система взаимосвязи является линейной, постоянной и описывает статические свойства объекта. Для нелинейной превращающей системы принцип суперпозиции неприемлем и использовать его нельзя, но в определенных границах изменений и влияния переменных конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов на уровень конкурентоспособности может быть применена линеаризация, т.е. замена нелинейных уравнений линейными:

$$Y_1 = F_1(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_m}) = \sum_{j=1}^m (\partial_{z_1} / \partial_{x_j})_0 (x_j - m_{x_j});$$

$$Y_2 = F_2(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_m}) = \sum_{j=1}^m (\partial_{z_2} / \partial_{x_j})_0 (x_j - m_{x_j});$$

.....

$$Y_n = F_n(m_{x_1}, m_{x_2}, \dots, m_{x_m}) = \sum_{j=1}^m (\partial_{z_n} / \partial_{x_j})_0 (x_j - m_{x_j}),$$

где F_i – дифференциальные функции связи уровня конкурентоспособности изделия Y_i с входными переменными факторами;

x_j, m_{x_j} – математические ожидания погрешностей входных факторов и превращающей системы;
 $\partial_{z_i} / \partial_{x_j}$ – значение частных производных после подстановки в них вместо каждого аргумента его математического ожидания.

В дальнейшем в целях упрощения рассматривают линейную зависимость или линеаризованную. В приведенных уравнениях самым сложным является получение матриц корреляционных коэффициентов, которые можно рассматривать как опера-

торы линейных превращений входных переменных факторов в уровни конкурентоспособности.

Элементами главных диагоналей являются коэффициенты корреляции основных звеньев, а остальные – перекрестных звеньев. При отсутствии связи между факторами и уровнями конкурентоспособности на соответствующих местах

матрицы проставляют нули. Поскольку вид матрицы определяет соотношение между числом входных и выходных переменных, то они могут быть квадратными, строчными, диагональными или как в данном общем случае – прямоугольными.

Определение матрицы сводится к нахождению численных значений коэффициентов корреляции одним из двух способов. Если функциональная зависимость между входными и выходными переменными известна, то такие коэффициенты рассчитывают аналитически как частные производные, получаемые дифференцированием функции от входных переменных. В противоположном случае коэффициенты корреляции определяют экспериментально, считая, что статистическим аналогом функциональной зависимости является уравнение множественной линейной регрессии. Обработку полученных результатов выполняют способом наименьших квадратов или методом парных корреляций [4, 5].

Влияние групповых формирующих факторов конкурентоспособности может быть представлено также в виде графа, в котором вершины – это факторы, а дуги – величины факторов. Тогда граф описывают матричным уравнением

$$Y = |k_1, k_2, \dots, k_7| \begin{pmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \dots \\ X_7 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где Y – уровень конкурентоспособности;
 k_j – коэффициенты влияния (корреляции);



X_j – определяющие факторы.

Уравнение можно представить как

$$Y = k_1 X_1 + k_2 X_2 + \dots + k_7 X_7. \quad (4)$$

Если уровень конкурентоспособности формируют по отдельным элементам, то используют следующее выражение:

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} c_{11} & c_{12} & \dots & c_{1mn} \\ c_{21} & c_{22} & \dots & c_{2mn} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ c_{m1} & c_{m2} & \dots & c_{mn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \\ \vdots \\ p_m \end{pmatrix}, \quad (5)$$

где c_{ji} – коэффициенты корреляции отдельных составляющих;

p_j – затраты на их реализацию.

Вывод

При организации выпуска изделий обязательна опережающая оценка их конкурентоспособности. Методика ее проведения состоит в том, что на компьютере виртуально рассчитывают комплексное влияние всех формирующих факторов. Вначале устанавливают внутренние связи между различными факторами, затем формируют электронную базу данных, необходимую для такого расчета, и, наконец, используют типовые информационные модели для конкретных видов оценок. После получения величин виртуальных показателей качества, затрат и уровня конкурентоспособности делают заключение о будущей разработке изделия.

Можно сформулировать семь положений, определяющих высокую конкурентоспособность запускаемых в производство изделий:

- совершенствование конструкции изделия, т.е. увеличение показателей качества;
- приближение технологии его изготовления к CALS-технологиям;
- снижение производственных затрат на изготовление изделия; приближение производства к компьютерно-интегрированному;
- снижение эксплуатационных затрат при повышении надежности и долговечности, а также простота использования и обслуживания, организации сервиса и т.п.;
- благоприятные рыночные условия, в первую очередь конкуренция, потребность, приемлемая цена, реклама, доставка и т.п.;
- благоприятные юридические условия, налоги, прибыль, поддержка, финансовая система, отсутствие коррупции и т.п.;
- минимизация дополнительных незапланированных расходов.

Библиографический список

1. Волчкевич Л.И. Конкурентоспособность автоматической сборки в дискретном производстве // Материалы IV Международной конференции "Модульные технологии и конструкции в технологии машин". Жешов. 2006. С. 9–14.
2. Кузьмін О.С., Горбаль Н.І. Управління міжнародною конкурентоспроможністю підприємства. Львів: Компакт-ЛВ. 2005. 304 с.
3. Антонюк Л.Л. Міжнародна конкурентоспроможність країни: теорія та механізм реалізації: Монографія. Київ: КНЕУ, 2004. 275 с.
4. Дженінгстон Д. Методологія управління конкурентоспроможністю корпорацій: Підручник. Харків: Основа, 2000. 362 с.
4. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. Киев. "Техніка", 1985. 768 с.

ВНИМАНИЕ!

Имеется в продаже учебное пособие

Волчкевич Л.И. АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ.

2-е изд. М.: Машиностроение, 2007. 380 с. Цена 308 руб. с НДС.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

по почте: 107076, Москва, Стромьинский пер., 4;

по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00; 269-52-98
и на сайте WWW.MASHIN.RU

А.С. Гольдин, канд. техн. наук

Тепловой дисбаланс ротора

Рассмотрены проблемы возникновения и устранения теплового дисбаланса ротора.

The problem of emergence and trouble heat disbalance rotor is considered.

Ключевые слова: дисбаланс ротора, теплота, вибрация, электрическая машина, статор, газовая турбина, паровая турбина.

Key words: disbalance rotor, heat, vibration, electrical machine, stator, gas turbine, steam turbine.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Тепловым дисбалансом считают дисбаланс, который является следствием прогиба ротора машины под действием тепловых явлений.

Появление теплового дисбаланса объясняется одной из следующих причин:

- асимметрией температурного поля в роторе, возникающей по разным причинам;
- изгибающими моментами, вызванными осевыми усилиями при тепловых расширениях насадных деталей;
- неоднородностью свойств материала ротора или его тепловой нестабильностью.

При асимметрии температурного поля ротор прогибается в сторону большей температуры. Для свободно опертого стального ротора при линейном распределении температуры в радиальном направлении стрелу прогиба можно определить по приближенной формуле

$$y \approx 1,5 \cdot 10^{-6} \frac{l^2 \Delta t}{d},$$

где l – длина ротора;
 d – его диаметр;

Δt – разность температур между "горячей" и "холодной" образующими ротора, °С.

Например, при длине ротора 8 м и диаметре 1 м на каждый градус разницы температур стрела прогиба составит 0,1 мм, что примерно в 20 раз превышает допуск на отклонение центров масс при балансировке на станке.

Для теплового дисбаланса характерна зависимость вибрации от нагрузки агрегата, при этом каждому установившемуся тепловому режиму соответствует определенная вибрация. Ее изменение при тепловом дисбалансе может быть обозначено вектором вибрации $\Delta \bar{A}$ (рис. 1), а вектор суммарной вибрации проходит промежуточные состояния $\bar{A}_0, \bar{A}_1, \bar{A}_2, \bar{A}_3$.

Рост вибрации происходит не одновременно с изменением нагрузки агрегата, а постепенно, по мере изменения теплового состояния металла. Важнейшим диагностическим признаком теплового дисбаланса является существенный рост вибрации на первой критической частоте при выбеге прогретого ротора.

Тепловой дисбаланс по своему проявлению схож с режимной расцентровкой. Дифференциальная диагностика в особых случаях затруднена, тем более что расцентровка сама по себе может вызвать тепловой дисбаланс, связанный с прогибом ротора в плоскости шейки. Достаточно точно тепловой дисбаланс определяется и диагностируется балансировочными методами.

Особым случаем является тепловой дисбаланс, вызванный задеваниями ротора о статорные элементы.

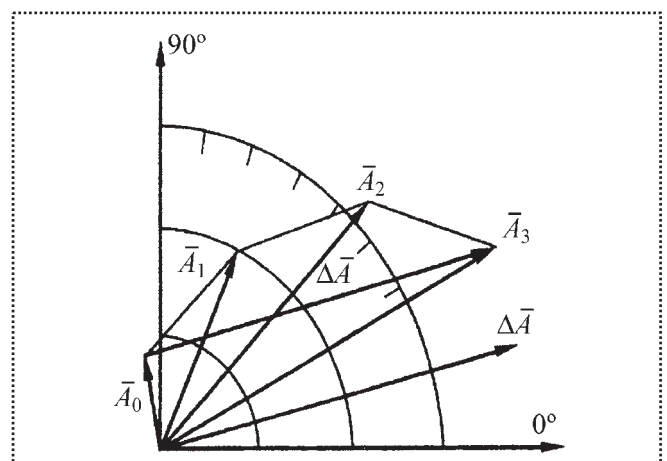


Рис. 1. Характер изменения вибрации опор при тепловом дисбалансе:

\bar{A}_0 – вибрация на холостом ходу; \bar{A}_1, \bar{A}_2 – вибрация при промежуточных нагрузках; \bar{A}_3 – вибрация при номинальной нагрузке; $\Delta \bar{A}$ – тепловой вектор



Задевания ротора о статор вызваны недостаточными радиальными и осевыми зазорами, плохой центровкой уплотнительных колец, расцентровкой уплотнений при тепловых деформациях статорных узлов (например, при забросе воды в горячий цилиндр турбины), большим начальным эксцентриситетом ротора.

Задевания в уплотнениях являются одной из распространенных причин теплового дисбаланса.

Первоначальный тепловой прогиб вызывает усиление задеваний и повышение тепловыделения в местах контакта вследствие сухого трения. Прогиб нарастет лавинообразно, вибрация достигает высоких значений и обычно требует экстренной остановки турбоагрегата. Нередко последствием задеваний является остаточный прогиб ротора.

При задеваниях в спектре вибрации подшипников возникают всплески высокочастотной вибрации, что является одним из диагностических признаков задеваний. Задевания на небольшой частоте вращения (до $1000\text{--}1500\text{ мин}^{-1}$) прослушиваются стетоскопом ("слухачом") и воспринимаются как "чирканья". Иногда места возможных задеваний оборудуются микрофонами, сигналы от которых могут использоваться для акустической диагностики либо после усиления транслируются через динамики в помещение обслуживания (на щит).

Из практики известно, что на гибких роторах места интенсивных задеваний располагаются не произвольно, а в соответствии с тем, какая форма колебаний соответствует собственной частоте, непосредственно следующей за частотой вращения: если эта форма нечетная (первая, третья), то места интенсивных задеваний располагаются симметрично, если четная (обычно вторая) – кососимметрично.

Таким образом, при прогреве на частоте вращения ниже первой критической места интенсивных задеваний обычно располагаются симметрично, а на номинальной частоте, существенно превышающей первую критическую и ниже второй критической, – кососимметрично.

Эта особенность объясняется динамикой роторов: в докритической области тепловой прогиб от задеваний и вызванный им упругий прогиб по со-

ответствующей форме складываются, что способствует усилению задеваний. В закритической области упругий прогиб противоположен тепловому (за резонансом упругий прогиб отстает от дисбаланса примерно на 180°) и компенсирует последний, задевания при этом прекращаются либо стабилизируются на достаточно низком уровне.

Появление остаточного прогиба вследствие задеваний связано с тем, что в месте задевания возникает местный перегрев вала. Нагретый участок, расширяясь, испытывает напряжения сжатия, которые могут превзойти предел текучести. В последнем случае на участке задеваний возникает остаточная деформация – укорочение соответствующих волокон в осевом направлении, следствием является остаточный прогиб в сторону, противоположную задеваниям.

Характерный ход процесса, связанного с возникновением остаточного прогиба, изображен на рис. 2.

Рост вибрации при задеваниях в ряде случаев устанавливается на достаточно высоком уровне. Установившийся уровень вибрации соответствует тепловому равновесию, при котором тепловыделение в точках задеваний оказывается равным теплоотводу внутрь ротора; если это равновесие наступает раньше, чем возникают пластические деформации в роторе, то остаточного прогиба не будет.

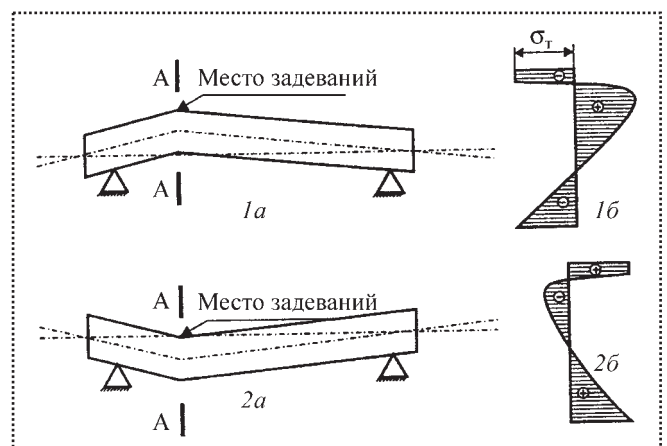


Рис. 2. Деформации ротора при задеваниях с появлением остаточного прогиба:

1 – деформации (а) и эпюра напряжений (б) в сечении АА при задеваниях; 2 – деформации (а) и эпюра напряжений (б) в сечении АА после остывания на остановленном роторе



Задевания не всегда приводят к интенсивному росту вибрации. Они могут быть следствием, а не причиной вибрации. В большинстве случаев небольшие задевания компенсируются местной выработкой радиальных уплотнений.

Опасные задевания не возникают при обеспечении достаточных радиальных и осевых зазоров между ротором и деталями статора.

ТЕПЛОВОЙ ДИСБАЛАНС ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Чаще тепловой дисбаланс возникает на роторах генераторов и других электрических машин, имеющих в этих роторах обмотку возбуждения. Причинами могут быть витковые замыкания в обмотке ротора, асимметрия охлаждения (преимущественно у роторов с форсированным охлаждением), отсутствие тепловых зазоров между пазовыми клиньями.

Диагностическим признаком асимметрии охлаждения является зависимость вибрации от интенсивности процессов теплообмена или от разности температур между ротором и охлаждающим газом. При этом вибрация меняется как при повышении нагрузки, так и в случае резкого изменения температуры охлаждающего газа. От температуры ротора вибрация при этом не зависит.

Диагностическим признаком недостаточных осевых зазоров в пазовых клиньях является зависимость вибрации от температуры ротора, при этом не имеет значения, при какой нагрузке достигнута рассматриваемая температура. Таким же образом изменяется вибрация при неоднородности материала ротора на протяжении всего периода эксплуатации с момента монтажа.

На асинхронных электродвигателях тепловой дисбаланс может быть следствием обрыва стержней "беличьей клетки", а также загромождения охлаждающих каналов ротора установленными балансировочными грузами либо засорения.

Меры профилактики отмеченных причин теплового дисбаланса у роторов электрических машин состоят в следующем:

- тщательное выполнение охлаждающих каналов и контроль их продуваемости;

- заглушение резьбовых отверстий, противоположных балансировочным пробкам, дюралюминиевыми заглушками, обязательное при использовании более двух полных пазов для установки балансировочных пробок;

- контроль тепловых зазоров в пазовых клиньях.

ТЕПЛОВОЙ ДИСБАЛАНС РОТОРОВ ПАРОВЫХ И ГАЗОВЫХ ТУРБИН

Наиболее распространенной причиной теплового дисбаланса роторов турбины является отсутствие осевых зазоров между насадными деталями ротора – рабочими дисками, уплотнительными втулками. Из-за небольших отклонений торцов насадных деталей от перпендикулярности оси при их расширении вместе со значительными осевыми усилиями возникают изгибающие моменты, приводящие к тепловому прогибу ротора.

Известны случаи, когда эта причина исчезала после разгона ротора до скорости срабатывания автомата безопасности за счет ослабления посадочных натягов и перемещения насадных деталей в осевом направлении. Эта же причина теплового прогиба ротора может иметь место на роторах насосов, имеющих насадные диски и работающих в горячей среде.

Тепловой дисбаланс у барабанных роторов может возникать из-за протечек пара или газа внутри ротора через неплотности в технологических заглушках и сварных соединениях. При этом горячий газ нагревает ротор несимметрично в соответствии с расположением мест его входа и выхода, что приводит к тепловому прогибу ротора.

На роторах, работающих в горячей среде, тепловые деформации возникают при попадании масла в его центральное отверстие через неплотности заглушки. Масло засасывается за счет понижения давления внутри ротора при его охлаждении во время остановок и накапливается. Наконец, его количество становится достаточным для конвективного теплообмена внутри ротора, при котором тепло переносится в осевом направлении от горячих поверхностей к холодным. Этот процесс, как



правило, протекает несимметрично относительно оси и приводит к тепловому дисбалансу.

Во многих случаях процесс становится неустойчивым, и тепловой дисбаланс нарастает лавинообразно, при этом машину приходится останавливать из-за чрезмерной вибрации. В связи с этим при обнаружении теплового дисбаланса на роторе, если неясны его причины, целесообразно проверить плотность центрального отверстия.

Для роторов, работающих в условиях высоких температур, тепловой дисбаланс может быть следствием неоднородности материала ротора (термическая нестабильность). Равномерно нагретый ротор при этом имеет тепловой прогиб.

Эта причина в эксплуатационной практике наблюдается крайне редко, поскольку в процессе изготовления заготовка ротора проходит тепловую пробу и при обнаружении термической нестабильности ротор бракуется.

Профилактика теплового дисбаланса у турбинных роторов состоит в контроле осевых зазоров при насадке деталей на вал при сборке и в обеспечении герметичности внутренних полостей ротора.

ОСОБЫЕ СЛУЧАИ ТЕПЛОВЫХ ДЕФОРМАЦИЙ РОТОРОВ

Как показали исследования [1], в шейках подшипников скольжения гибких роторов, как правило, возникает тепловой прогиб. Причина этого прогиба состоит в том, что под действием существующего дисбаланса возникает некоторое смещение оси шейки по отношению к оси вращения, при этом "бьющая точка" поверхности шейки движется относительно ближе к поверхности баббита с меньшим зазором по смазке и в связи в этом находится в зоне более высоких температур.

В подавляющем большинстве случаев рассматриваемый тепловой прогиб шейки невелик, неизменен во времени и практически независим от режима работы. В связи с этими обстоятельствами он проявляется как часть дисбаланса и обычными виброизмерениями не обнаруживается.

Эксперименты с использованием балансировочных ампул [2] показали, что влияние этого дополнительного теплового прогиба на вибрацию в

обычных случаях могут быть соизмеримы с исходными значениями вибрации от дисбаланса.

Не зная об этом явлении, специалист интерпретирует суммарное действие дисбаланса и связанного с ним теплового прогиба как исключительно механическое действие дисбаланса. По понятным причинам такая неточность не приводит к принципиальным ошибкам при постановке диагноза и виброналадке. Тем не менее, *учет рассматриваемого обстоятельства может объяснить некоторые вибрационные явления в машинах.*

Рассматриваемый тепловой прогиб увеличивается с ростом температурных градиентов в масляном слое при увеличении нагрузки на шейку и уменьшении зазоров по баббиту. Таким образом, при расцентровках более нагруженная шейка получает дополнительный тепловой прогиб. Понимание этого вносит дополнительную ясность в интерпретацию изменений вибрации при расцентровках.

При внезапном изменении дисбаланса вследствие поврежденной ротора (обрыв лопатки) вибрация меняется скачком, но после этого первоначального изменения возможно дополнительное заметное изменение вибрации в течение последующих 10–20 мин вследствие тепловых деформаций шеек. Такое изменение вибрации не должно вызывать недоумения и непродуктивного поиска дополнительных дефектов.

Как непосредственная причина повышенной вибрации рассматриваемое явление встречается достаточно редко.

При недостаточных зазорах по баббиту на подшипниках одного из роторов низкого давления на головном агрегате мощностью 800 МВт наблюдался непрерывный рост вибрации до весьма высоких значений вследствие недостаточных зазоров. Повышение вибрации прекратилось после изменения расточки вкладышей подшипников.

Для роторов на подшипниках скольжения с развитыми и гибкими консольными участками при частотах вращения, следующих непосредственно за резонансом консольного участка, возможен непрерывный неустойчивый рост прогиба с увеличением вибрации.



Рассмотрим механизм появления теплового дисбаланса в газовых турбинах вследствие неравномерного нагрева вала горячим газом.

На турбинных роторах газотурбинных установок температура рабочего тела обычно больше температуры вала. Если в турбине возникли условия, при которых газ от лопаток течет по направлению к оси ротора, то вследствие асимметрии этого процесса может возникнуть существенный тепловой дисбаланс.

В связи с тем, что асимметрия потока газа относительно ротора в основном определяется его экс-

центриситетом, а эксцентриситет дисбалансом, возникает механизм развития теплового прогиба с положительной обратной связью, который сопровождается непрерывным ростом вибрации. Однако такие события чрезвычайно редки.

Библиографический список

1. Гольдин А.С., Львов М.И., Урьев А.В. Тепловые деформации гибких роторов в подшипниках скольжения // Энергомашиностроение. 1983. № 5.
2. А.с. № 540183 (СССР). Способ динамической балансировки роторов / А.С. Гольдин, приоритет от 11.11.1973 г., опубл. 25.12.1976 г., бюл. № 46.



ТЕХНИЧЕСКОЕ РЕГУЛИРОВАНИЕ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

Н.В. Гусаков, Б.В. Кисуленко

2008. – 272 с.: ил. ISBN: 978-5-217-03447-5

Цена 440 р. с НДС

Словарь-справочник содержит более 2000 терминов, большинство из которых применяется при подготовке и выполнении процедур одобрения типа транспортного средства и подтверждения соответствия компонентов транспортных средств требованиям нормативно-технических документов. В ряде случаев для более глубокого понимания этих терминов приводятся определения общетехнических терминов, лежащих в основе специальной терминологии.

Предназначен для специалистов в области оценки соответствия колесных транспортных средств и их компонентов, а также для студентов и аспирантов, обучающихся по специальностям и направлениям автомобилестроения, автомобильного транспорта и смежных с ними областей.

Словарь-справочник может быть полезен сотрудникам органов контроля и надзора за безопасностью дорожного движения, а также работникам органов таможни, по роду своей профессиональной деятельности связанным с продукцией автомобилестроения.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы:
по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".

Адрес электронной почты издательства: E-mail: mashpubl@mashin.ru;
редакции журнала: sborka@mashin.ru; tsmm@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 02.02.09 г. Подписано в печать 02.04.09 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,23. Заказ 268. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство **Машиностроение**".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.