ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

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

4 2016 (189)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Калачев О.Н., Екимов О.А. Особенности методики экранной сборки цифрового прототипа в CAD Inventor Autodesk . . . 3

Серга Г.В., Белокур К.А., Лебедев В.А. Технологические особенности изготовления винтовых роторов для отделочно-упрочняющей обработки деталей . . . 8

Степанова М.А., Медведев А.М. Соединения типа press-fit *(аналитический обзор)* . . . 12

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Можегова Ю.Н., Антонова М.Е. Аппаратно-программный комплекс автоматизированного неразрушающего контроля физико-механических свойств изделий . . . 18

В помощь конструктору, технологу

Иванов Ю.В. Метод синтеза компьютерного проектирования техпроцессов и структур роботизированных комплексов сборки электронных изделий в многономенклатурном производстве . . . 22

Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Моделирование сборок в CAD . . . 29

Трение и смазка в машинах и механизмах

Минаев А.Я., Коровкин Ю.В. Экспериментальные исследования демпфирующих свойств магнитореологических эластомеров . . . 34

Дунаев В.В., Пучков В.Н. Прочность и износ элементов болтовых соединений в условиях фреттинга . . . 38

Шустер Л.Ш., Камалетдинова Р.Р., Чертовских С.В. Влияние нефтяной среды на триботехнические характеристики скользящего контакта в запорной арматуре . . . 45

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.: 8 (499) 269-54-98. Факс 8 (499) 269-48-97

E-mail: sborka@mashin.ru

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н.
И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.
А.В. МЕДАРЬ, д.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.
М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, д.т.н., проф., чл.-кор. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК

И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.
В.Г. ОСЕТРОВ, д.т.н., проф.
Б.А. ЯКИМОВИЧ, д.т.н., проф.

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

Ю.С. СТЕПАНОВ, д.т.н., проф.
Г.А. ХАРЛАМОВ, д.т.н., проф.

ОРЕНБУРГ

А.Н. ПОЛЯКОВ, д.т.н., проф.
А.И. СЕРДЮК, д.т.н., проф.
А.П. ФОТ, д.т.н., проф.

ПЕРМЬ

С.М. БЕЛОБОРОДОВ, д.т.н.
В.Ф. МАКАРОВ, д.т.н.

РОСТОВ-НА-ДОНУ

В.И. КОЛЕСНИКОВ, акад. РАН и РИА (зам. гл. редактора)
А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф.
В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.
А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

САМАРА

Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.
М.А. ЕВДОКИМОВ, д.т.н., проф.

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОМСК

А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.
В.Е. ПАНИН, акад. РАН

ТУЛА

А.А. МАЛИКОВ, д.т.н., проф.
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

А.С. ЗЕНКИН, д.т.н., проф.
В.А. МАТВИЕНКО, к.т.н.

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.
Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2016

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

4 2016 (189)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Kalachev O.N., Ekimov O.A. Features screen technique to build a digital prototype CAD Inventor Autodesk 3
Serga G.V., Belokur K.A., Lebedev V.A. Technological features of manufacture of screw rotors for finishing and hardening machining 8
Stepanova M.A., Medvedev A.M. Press-fit connections *(analytical review)* 12

Quality assurance. Testing. Monitoring

Mozhegova Yu.N., Antonova M.E. Hardware-software complex automated non-destructive testing of physical and mechanical properties of products 18

Industrial and design engineer's aid

Ivanov Yu.V. Methods of synthase computer design technological operations and structures robotic complex of assembly electronics modules in multinomenclature production 22
Samarkina E.I., Samarkin A.I., Dmitriyev S.I., Evgenyeva E.A. Modeling assemblies to CAD 29

Friction & lubrication

Minaev A.Ya., Korovkin Yu.V. Experimental investigation of damping properties of magneto reological elastomeasurement 34
Dunaev V.V., Puchkov V.N. Strength and fretting-wear in bolted joint 38
Shuster L.Sh., Kamaletdinova R.R., Chertovskih S.V. Impact on the environment oil tribological characteristics of sliding contacts in the shut-off valves 45

Journal is distributed on subscription, whith can be issues 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.: 8 (499) 269-54-98. Fax: 8 (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
A.A. GUSEV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA
Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
Yu.G. KOZYREV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

IZHEVSK
I.V. ABRAMOV
V.G. OSETROV
B.A. YAKIMOVICH

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY
S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTIUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON
V.I. KOLESNIKOV
A.A. RYZHKIN

RYBINSK
V.F. BEZIAZYCHNYI
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:
E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by Ministry of Telecom and Mass Communications of RF.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2016

УДК 621.8:004.9

О.Н. Калачев, *канд. техн. наук,* **О.А. Екимов**
(Ярославский государственный технический университет)
E-mail: Okalachev@mail.ru

Особенности методики экранной сборки цифрового прототипа в CAD Inventor Autodesk*

Рассмотрены приемы работы с CAD Inventor Autodesk по созданию конструкторской документации на основе цифрового проектирования и промежуточный этап проектирования — прочностной анализ. Показаны методы проектирования стандартной КД и создание трехмерной интерактивной документации.

In this paper some techniques for working with CAD Autodesk Inventor for creating design documentation based digital design. Considered an intermediate stage in the design — strength analysis. Shown design methods a standard CD and a three-dimensional interactive documentation.

Ключевые слова: цифровой прототип, трехмерная интерактивная документация, прочностной анализ, конструкторская документация.

Keywords: digital prototype, three-dimensional interactive documentation, strength analysis, design documentation.

Альбомное представление изделия, прочностной анализ и создание конструкторской документации в CAD Inventor Autodesk

После завершения этапов создания цифрового прототипа изделия, в ходе реализации парадигмы цифрового прототипирования выполняется создание альбомного представления, прочностной анализ нагруженных деталей, по результатам которого вносятся необходимые изменения критических размеров трехмерных моделей и создается конструкторская документация: чертежи и спецификации.

1. Создание интерактивной трехмерной проектной документации

При автоматическом разведении деталей трудно получить полное представление о составе изделия (рис. 1 на стр. 2 обложки): разные детали необходимо отводить на разные расстояния.

Для ручного разведения воспользуемся окном настройки сдвига компонента и укажем "Направление" — при наведении курсора на болт появляются координатные оси, зафиксируем их нажатием левой кнопки. В окне настройки выбираем ось, вдоль которой будет происходить сдвиг, в данном случае — ось z, в рабочем поле зажимаем левую кнопку мыши и сдвигаем модель по направлению этой оси (рис. 2 на стр. 2 обложки).

Таким образом, последовательно "разбираем" все изделие, обеспечивая необходимую наглядность (рис. 3 на стр. 2 обложки).

2. Прочностной анализ

Autodesk Inventor Professional позволяет выполнять расчет деталей на прочность методом конечных элементов. Покажем особенности расчета на примере вала (рис. 4 на стр. 2 обложки).

На панели быстрого запуска выберем команду "Анализ напряжений", далее "Создать моделирование" и в окне типов моделирования — "Статический анализ". На дереве моделирования зададим материал вала —

* Окончание.

в открывшемся списке выберем "Назначить материалы" — "сталь" (рис. 5 на стр. 3 обложки).

Для определения зависимостей из контекстного меню выбираем "Опора" и указываем месторасположение опор (рис. 6 на стр. 3 обложки).

Далее во всплывающем окне "Момент" укажем нагрузки: вводим значение предварительно рассчитанного крутящего момента, выберем поверхности, к которым прикладываем крутящий момент.

Следующий шаг — задание контактов. Во всплывающем меню выбираем "Автоматический контакт". На панели инструментов указывается "Вид сети". Нажатием кнопки "Моделировать" рассчитаем напряжения и отобразим их с помощью гаммы цветов. Красный — максимальные напряжения, синий — минимальные (рис. 7 на стр. 3 обложки). Как видно из рисунка, концентратором напряжений является шпоночный паз. Точность расчета оценивается путем сопоставления результатов при разных плотности сетки, коэффициенте разнородности, максимальном угле поворота.

Выполним повторный расчет, изменяя средний размер и угол поворота. Результат несколько изменился, но дальнейшее повышение плотности сетки не влияет на точность расчета (рис. 8 на стр. 4 обложки).

3. Формирование конструкторской документации

Методика полуавтоматического создания чертежей конструкторской документации предполагает выбор главного вида и размещение проекций, а затем добавление необходимых технических требований (ТТ). Шрифты соответствуют требованиям ЕСКД. Для создания чертежа на панели инструментов выбираем вкладку "Чертеж", затем "Базовый" — вид спереди отображается на листе (рис. 9). По необходимости можно менять форматы листов от А4 до А1.

Проецируем вспомогательные виды иконкой "Проекционный", выбираем главный вид и указываем сторону, где нужно создать вид (рис. 10, *а*). Чтобы проставить габаритные размеры на панели быстрого запуска, нажимаем иконку "Размеры". Проставляем необходимый размер (рис. 10, *б*), назначаем допуск и точность.

Все размеры ассоциативно связаны с 3D-моделью, т.е. при изменении размера на модели меняется размер на чертеже (рис. 11 на стр. 4 обложки).

Простановка общей шероховатости обеспечивается блоком шероховатости на панели быстрого запуска — "Не указанная шероховатость" (рис. 12).

В нижнем правом углу чертежа укажем текстовые ТТ, нажатием иконки "Текст". Заполним основную надпись — вкладка "Пояснения" → "Основная надпись" (рис. 13).

Для простановки недостающих осевых линий на чертеже на панели быстрого запуска выбираем иконку "Осевая линия" и с помощью объектных привязок выбираем начальную и конечную точки осевой линии (рис. 14 на стр. 4 обложки).

Таким образом, создается комплект чертежей на изделие "валковый механизм" (рис. 15).

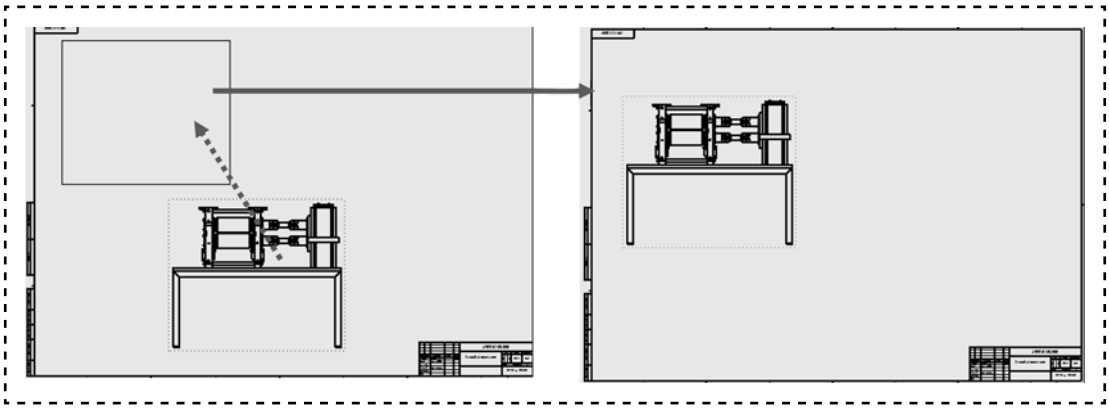
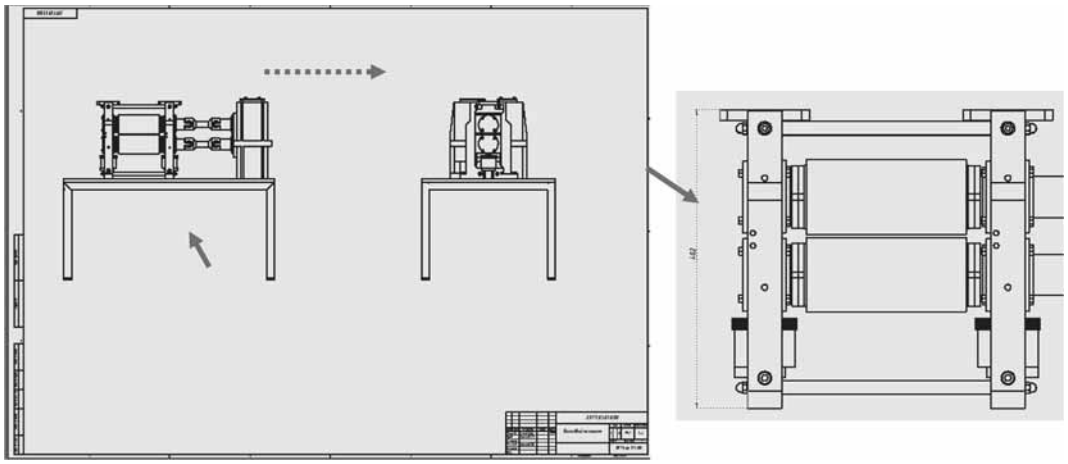


Рис. 9. Создание главного вида



а *б*

Рис. 10. Спроецированный вид (*а*) и простановка размера (*б*)

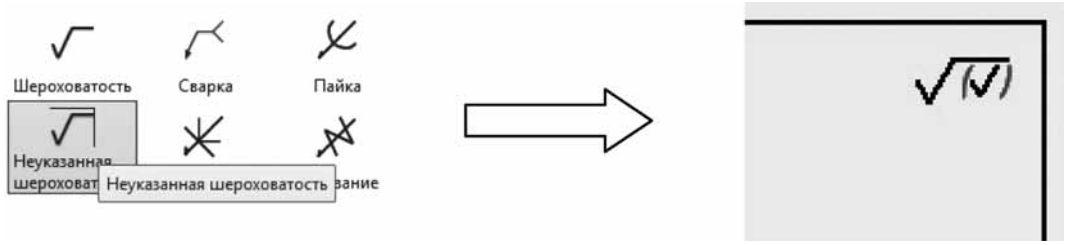


Рис. 12. Простановка шероховатости

Рис. 13. Заполненная основная надпись и проставленные текстовые технические требования

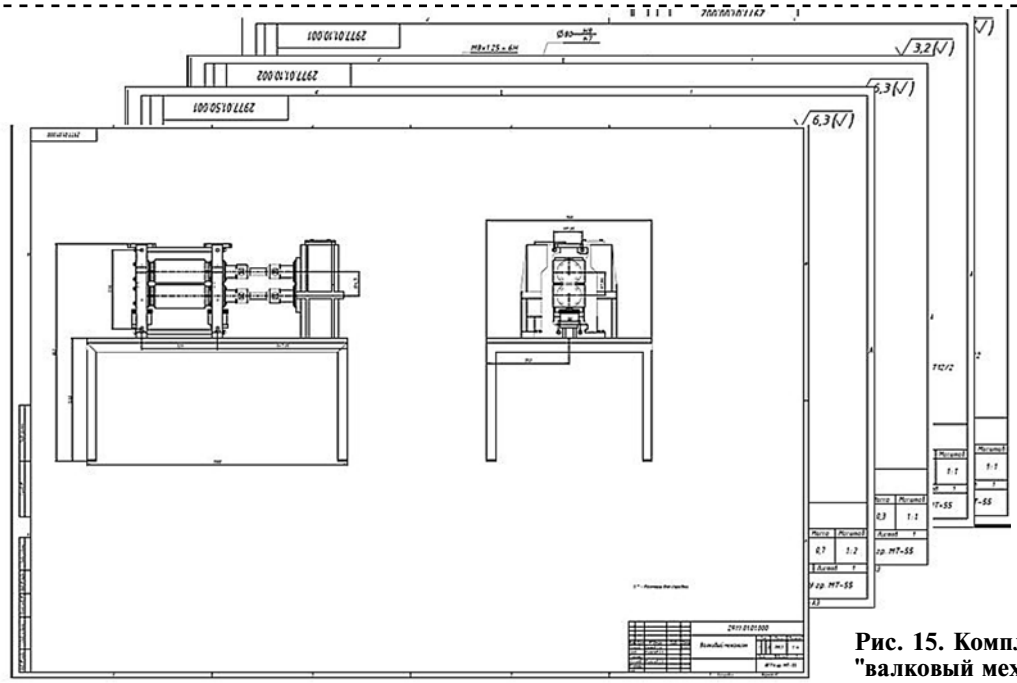
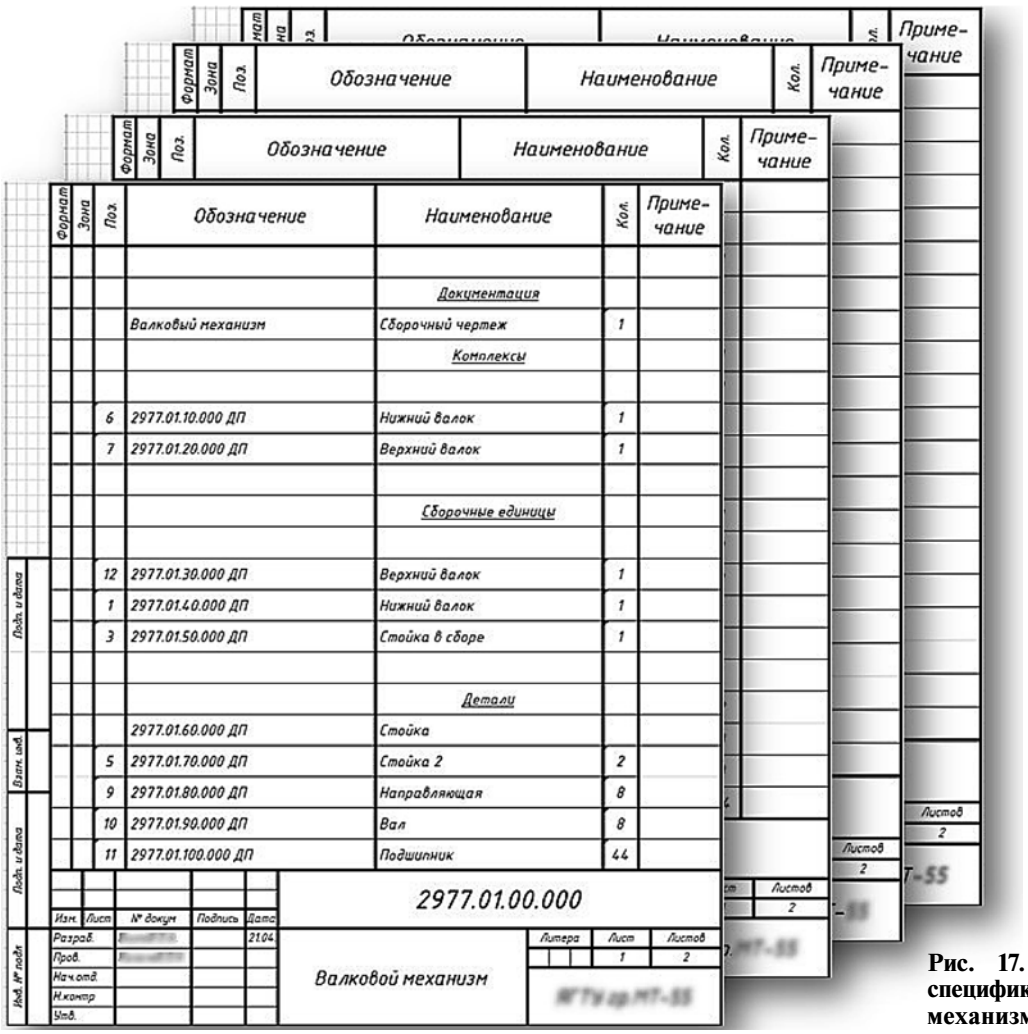


Рис. 15. Комплект чертежей на изделие "валковый механизм"



Формат	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примечание
				Документация		
			Валковый механизм	Сборочный чертеж	1	
				Комплексы		
		6	2977.01.10.000 ДП	Нижний валок	1	
		7	2977.01.20.000 ДП	Верхний валок	1	
				Сборочные единицы		
		12	2977.01.30.000 ДП	Верхний валок	1	
		1	2977.01.40.000 ДП	Нижний валок	1	
		3	2977.01.50.000 ДП	Стойка в сборе	1	
				Детали		
			2977.01.60.000 ДП	Стойка		
		5	2977.01.70.000 ДП	Стойка 2	2	
		9	2977.01.80.000 ДП	Направляющая	8	
		10	2977.01.90.000 ДП	Вал	8	
		11	2977.01.100.000 ДП	Подшипник	44	

2977.01.00.000

Изм. | Лист | № докум | Подпись | Дата

Разраб. | Пров. | Нач.отд. | Н.контр | Утв.

Валковый механизм

Литера | Лист 1 | Листов 2

Рис. 17. Пакет сформированных спецификаций на изделие "валковый механизм"

4. Формирование спецификации

Создание спецификации по 3D-модели возможно двумя способами.

Первый способ — на основе дерева 3D-моделей и открытой сборки формируется окно (рис. 16 на стр. 4 обложки).

Этот вид спецификации не соответствует требованиям ЕСКД, но есть возможность создания файла формата .html, объединяющего пиктограммы и обозначения структурных единиц.

Для создания спецификации по ЕСКД вторым способом на панели быстрого запуска выбираем пиктограмму "Спецификация". Откроется окно просмотра списка деталей будущей спецификации. Inventor может экспортировать этот список в Excel файл, где возможно откорректировать обозначения и наименования (рис. 17).

Выводы

Разобраны основные особенности заключительных этапов проектирования на основе принципов цифрового прототипирования: объемного представления изделия средствами *Autodesk Inventor и Autodesk Inventor Publisher*, прочностного анализа конструкции, результаты которого могут быть учтены в параметрическом прототипе. Наличие ассоциативности обеспечивает автоматическое изменение чертежной документации, а автоматическое формирование нестандартной спецификации в виде html-файла с внедренными пиктограммами деталей несомненно найдет применение помимо традиционной конструкторской документации для отражения состава сложных изделий.

Библиографический список

1. **Тремблей Т.** Inventor 2013 и Inventor LT 2013. Официальный учебный курс. М.: ДМК, 2013. 344 с.

2. **Калачев О.Н., Чумак Е.А.** Автоматизация проектирования в MCAD-системе сборок типовых приспособлений для механообработки // Автоматизация и современные технологии. 2004. № 6. С. 18—25.

3. **Калачев О.Н., Карулин А.В., Трошин В.А**. Компьютерно-интегрированное проектирование в среде NX 7.5 при изготовлении литьевой оснастки в рамках учебного процесса на кафедре технологии машиностроения // CAD/CAM/CAE Observer. Рига, 2011. № 8. С. 77—82.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

☑ *За наличный и безналичный расчет.*
☑ *С любого номера и на любой срок.*
☑ *Без почтовых наценок.*

Присылайте заказ и обращайтесь за дополнительной информацией в отдел продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: 8 (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 621.9.015

Г.В. Серга, *д-р техн. наук,* **К.А. Белокур,** *канд. техн. наук*
(Кубанский государственный аграрный университет, г. Краснодар),
В.А. Лебедев, *канд. техн. наук*
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: va.lebidev@yandex.ru

Технологические особенности изготовления винтовых роторов для отделочно-упрочняющей обработки деталей

Представлены технологии изготовления винтовых роторов, применяемых для отделочно-упрочняющей обработки деталей, в основу которых положены различные способы их формообразования, обеспечивающие требуемую по сечению и длине кривизну внутренних поверхностей ротора.

The technology of screw rotors, used for finishing and strengthening treatment parts which are based on various methods for their formation for providing the desired cross-section and lengthwise curvature of the inner surfaces of the rotor.

Ключевые слова: винтовой ротор, формообразование, плоский элемент, полоса, соединение, винтовая линия, кривизна поверхности.

Keywords: screw rotor forming, flat member, the band, the compound helix, the curvature of the surface.

Винтовые роторы — это пространственные объекты с оригинальной геометрической формой периметра рабочего органа, в которых детали и гранулы обрабатывающей среды осуществляют одновременно непрерывное вращательное движение вокруг оси рабочего органа и поступательное движение, непрерывно перемещаясь вдоль горизонтальной оси вращения рабочего органа (рис. 1). Такие движения в винтовых роторах обеспечиваются массам загрузки за счет оформления их наружных поверхностей дискретно расположенными по периметру плоскими элементами различной формы и типоразмеров, разнонаправленных по отношению к винтовым линиям по их наружной поверхности [1, 2].

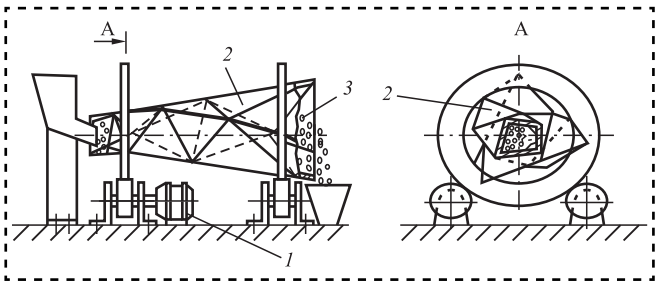


Рис. 1. Установка для отделочно-зачистной и упрочняющей обработки на базе винтового ротора:
1 — электродвигатель; *2* — галтовочный барабан; *3* — отверстия для удаления отходов (облой, окалина и т.п.)

Эти винтовые линии и поверхности придают массам загрузки движение с большой амплитудой от 10 до 500 мм и более. Применение винтовых барабанов позволяет расширить технологические возможности отделочно-зачистной и упрочняющей обработки деталей, а также эффективно решить вопросы, связанные с загрузкой, выгрузкой и транспортировкой деталей в процессе обработки.

По конструктивному исполнению можно выделить две большие группы винтовых роторов:

— ***первая группа*** объединяет винтовые роторы условно цилиндрической формы с постоянным по длине ротора шагом винтовых линий;

— ***вторая группа*** объединяет винтовые роторы условно конической формы с переменным по длине ротора шагом винтовых линий.

Все винтовые роторы можно разделить на семь классов с различными конструктивными

особенностями и типами винтовых (зигзагообразных) линий. Каждый класс, в свою очередь, состоит из нескольких подклассов, отличающихся друг от друга числом винтовых (зигзагообразных) линий по периметру винтового ротора.

С технологической точки зрения изготовление винтовых роторов представляет определенные сложности и требует выполнения специфичных сборочных приемов, обеспечивающих требуемую траекторию движения массы загрузки и, как следствие, производительность процесса обработки.

Технологические способы формообразования винтовых роторов

Первый способ. Винтовые роторы независимо от их конструктивных особенностей изготовляют путем соединения (клейкой, сваркой, пайкой и т.д.) отдельных плоских элементов в форме треугольников, трапеций, четырехугольников (рис. 2), получаемых различными технологическими способами механической обработки (резкой, штамповкой и т.д.). Перед соединением кромки плоских элементов толщиной 3 мм и более подвергают дополнительной обработке с целью получения скосов (см. рис. 2).

Второй способ. Винтовые роторы изготовляют из полосового материала. С помощью трех и более полос формируется направляющая поверхность ротора (рис. 3). Соединительные кромки полос образуют винтовую линию в продольном сечении винтового ротора. В результате по периметру винтового ротора образуются различные по шагу и числу заходов направленные навстречу друг другу винтовые внутренние поверхности, и соответствующие их пересечениям винтовые линии внутренней поверхности. Наличие сложных поверхностей в виде сочетания двух криволинейных поверхностей создает условия для возникновения в каждой точке разнонаправленных составляющих векторов движения, что приводит к усилению

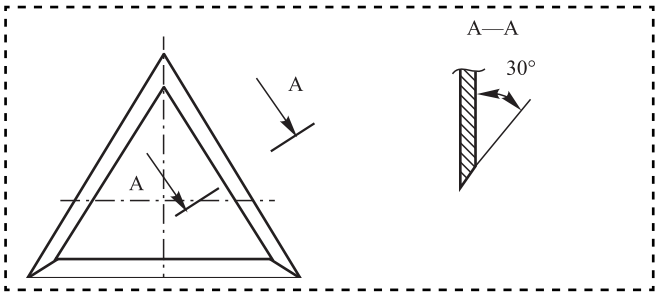


Рис. 2. Плоский элемент винтового ротора

технологического и транспортного эффекта обработки.

Полосы могут иметь переменную ширину, в частности, постепенно сужающуюся от одного конца ротора к другому, благодаря чему можно осуществлять постепенное уплотнение массы материала. Они могут быть выполнены ребристыми в поперечном направлении, при этом каждые два смежных ребра полосы пересекаются между собой и с двумя ребрами другой смежной полосы на продольной винтовой линии смежных полос с образованием чередующихся граней, расположенных попарно под тупым углом друг к другу с наружной и внутренней сторон ротора. Эти углы могут быть либо равными, либо постепенно возрастающими от одного конца ротора к другому в зависимости от требований к обработке.

На рис. 3 показан винтовой ротор, образованный тремя полосами *1*, *2* и *3*. Каждая из этих полос скручена в продольном направлении относительно собственной оси симметрии. Кроме того, в поперечном сечении каждая полоса повернута относительно оси ротора так, что ее кромки образуют в поперечном направлении винтовую линию с одинаковым шагом для всех полос. Скручивание полосы обеспечивает

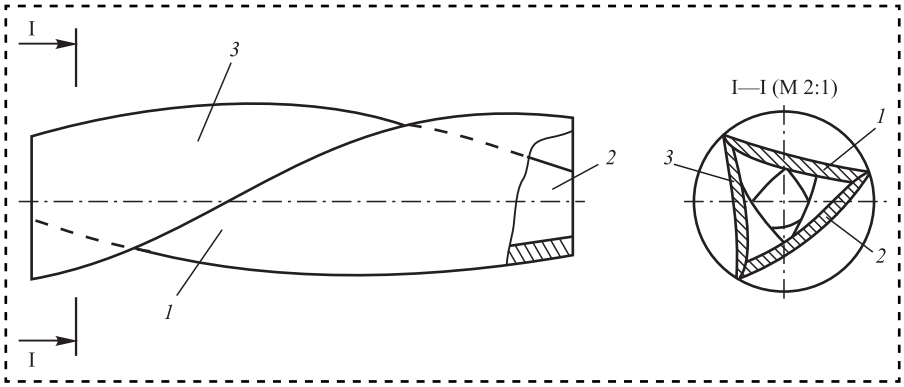


Рис. 3. Винтовой ротор с плавными винтовыми линиями по периметру

дополнительное искривление поверхности ротора, благодаря чему увеличивается разность между углами наклона векторов перемещения частиц или деталей в соседних участках поверхности ротора. При этом частицы или детали движутся по сложным траекториям, увеличивая частоту столкновений или иным образом интенсифицируя процесс.

На рис. 4 полосы *1*, *2*, *3*, *4*, образующие винтовой ротор, имеют переменную ширину, благодаря чему продольное и поперечное сечения ротора переменные. По периметру нагруженной поверхности ротора образованы разнонаправленные внутренние винтовые поверхности и линии с равным шагом и одинаковым числом заходов. Утолщенной линией показана проходящая через точки *5*, *6*, *7*, *8*, *9* одна из четырех плавных винтовых линий одного направления и составленная из отрезков кривых различной длины одна из четырех винтовых линий противоположного направления, проходящая через точки *10*, *11*, *7*, *12*, *13*.

Винтовой ротор аналогичной конструкции с чередующимися участками, но с постоянной шириной полос показан на рис. 5. Этот винтовой ротор имеет три плавных винтовых поверхности и линии одного направления, а также две ломаные винтовые поверхности и линии противоположного направления, причем шаг *S* винтовых поверхностей и линий одного направления в четыре раза больше шага винтовых поверхностей и линий противоположного направления. На рис. 5 утолщенной линией показаны проходящая через точки *1*, *2*, *3*, *4* часть одной из трех плавных винтовых линий одного направления и через точки *5*, *3*, *6*, *7* часть ломаных винтовых линий противоположного направления.

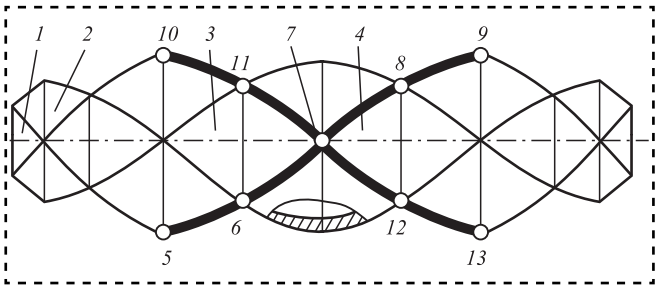


Рис. 4. Винтовой ротор с переменным продольным сечением

На рис. 6 показан винтовой ротор аналогичной конструкции с шестью винтовыми поверхностями и плавными линиями одного направления и шестью ломаными винтовыми линиями и поверхностями противоположного направления, одинакового шага. Утолщенной линией, проходящей через точки *1*, *2*, *3*, *4*, *5*, *6*, показаны одна из шести ломаных линий основного направления, составленная из отрезков кривых различной длины, и проходящая через точки *7*, *8*, *3*, *9*, *10*, *11* одна из шести плавных винтовых линий, противоположная основному направлению. Винтовой ротор изготовлен из шести расширяющихся по длине полос, образованных чередующимися участками, например, *12*, *13*, *14*, *15*, *16*, расположенными под тупыми углами друг к другу.

Для формообразования винтового ротора из полос предварительно каждую полосу *1* скручивают относительно ее продольной оси $O_1—O_1$ любым известным способом, например, фиксируя в горячем или холодном состоянии один из ее концов и поворачивая другой конец полосы в заданном направлении (рис. 7). Скрученную таким образом полосу *1* размещают на оправке *2* (рис. 8) и изгибают так, чтобы кромки *3* полосы *1* разместились в поперечном направлении по винтовой линии. При этом полоса *1* деформируется и ее либо снимают с оправки, либо фиксируют ее в деформированном положении. Аналогичным образом деформируют остальные полосы, образующие винтовой ротор.

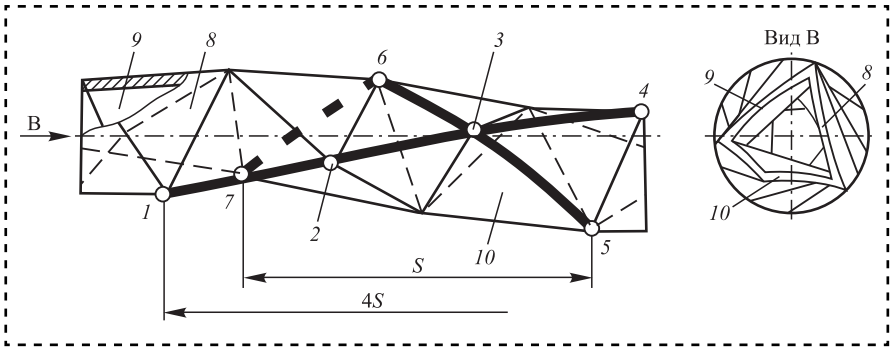


Рис. 5. Винтовой ротор с тремя винтовыми линиями основного направления и двумя винтовыми линиями противоположного направления

Полосы могут либо поочередно деформироваться на одной и той же оправке, либо деформи-

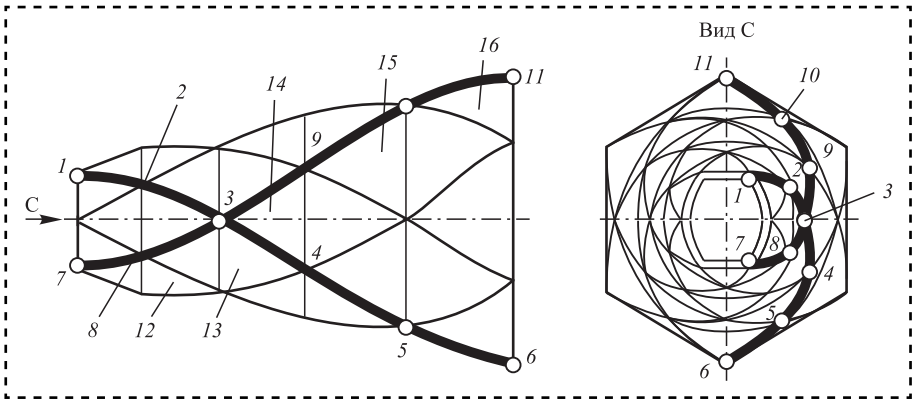


Рис. 6. Винтовой ротор с шестью взаимонаправленными винтовыми линиями

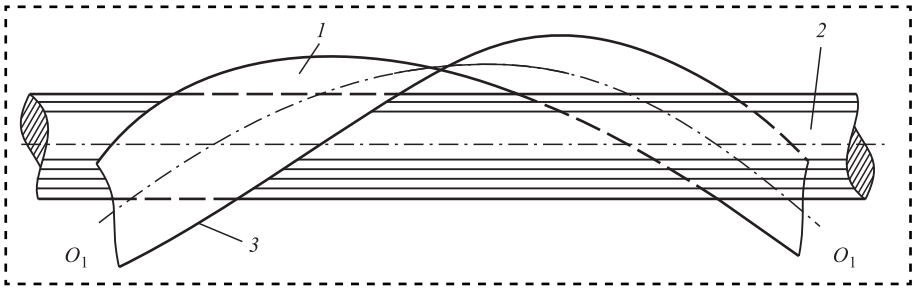


Рис. 7. Полоса, свернутая на оправке в винт

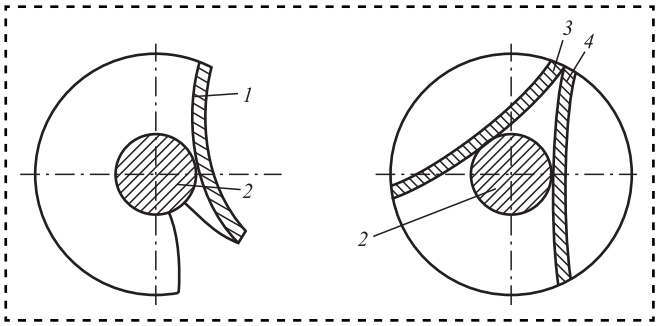


Рис. 8. Схема соединения полос в винтовой ротор

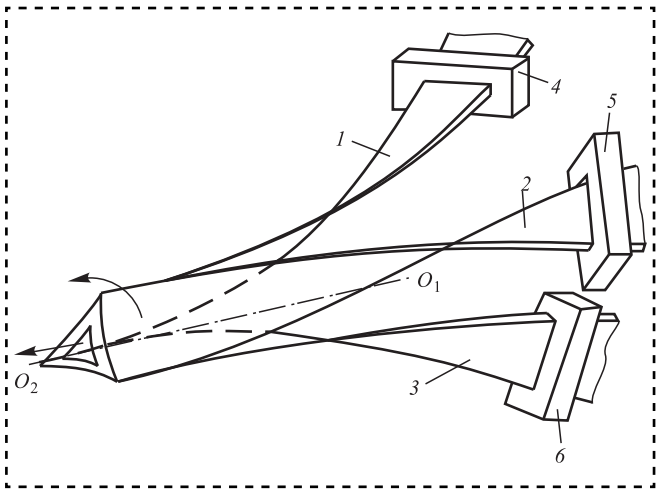


Рис. 9. Механизированный способ сборки винтовых роторов

роваться на оправке, на которой зафиксированы ранее деформированные полосы. В любом случае полосы *1* размещают на оправке *2* таким образом, чтобы кромки *3* и *4* соседних полос были совмещены, после чего эти кромки соединяют любым известным способом, например, сваркой. При этом шаг навивки всех полос на оправку должен быть одинаковым.

Полосы могут навиваться и без оправки с помощью любых подходящих приспособлений и устройств, обеспечивающих расположение продольных кромок полос по винтовой линии с одинаковым диаметром и шагом.

Третий способ. Каждую из полос *1*, *2*, *3* пропускают через направляющие щелевые держатели *4*, *5*, *6*, соединяют между собой, например сваркой, а затем соединенные между собой полосы поворачивают и поступательно перемещают с одинаковой скоростью, одновременно изгибая их так, чтобы их оси и кромки располагались по спирали относительно оси $O_2—O_2$ винтового ротора (рис. 9).

Заключение

Рассмотренные технологии формообразования винтовых роторов прошли опытно-экспериментальную отработку и могут быть рекомендованы для их изготовления в условиях единичного и серийного производства.

Библиографический список

1. **Серга Г.В., Иванов В.В., Лебедев В.А.** Разработка конструкций устройств с большой амплитудой колебаний для отделочно-зачистной обработки деталей машин: сб. тр. // Междунар. науч. симпозиум технологов-машиностроителей и механиков "Волновые, виброволновые технологии в машиностроении, металлообработке и других отраслях". Ростов-на-Дону, 2014. С. 344—352.

2. **Серга Г.В., Табачук И.И., Ярош Е.В., Лебедев В.А.** Интенсификация отделочно-упрочняющей обработки в галтовочных барабанах: сб. тр. // Междунар. конф. "Наукоемкие комбинированные и виброволновые технологии обработки материалов". Ростов-на-Дону. С. 368—372.

УДК 621.88.084 621.3.049.75

М.А. Степанова, А.М. Медведев, *д-р техн. наук*
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))
E-mail: marya.stepanova.argon@mail.ru

Соединения типа press-fit *(аналитический обзор)* *

Рассмотрены соединения, выполняемые запрессовкой и широко используемые в аппаратуре ответственного назначения (например, в авионике). Дано описание компонентов соединения и их влияния на надежность соединения типа press-fit.

Presents solderless connections, press-in connections, which are widely used in board equipment. The description of the connection components and their impact on the reliability of the connection is given.

Ключевые слова: непаяные соединения, печатные платы, авионика, бортовая аппаратура, соединения запрессовкой.

Keywords: solderless connections, printed circuit boards, avionics, board equipment, press-fit connections.

Запрессовываемые контакты

Основными компонентами, участвующими в создании прессового соединения и оказывающими влияние на размер зоны электрического контакта, а также величину сил электрического контакта и запрессовки, являются: запрессовываемый контакт, сквозное металлизированное отверстие и печатная плата.

При разработке конструкции запрессовываемых контактов соблюдают основные требования:

— все кромки запрессовываемого контакта, которые входят в соприкосновение со сквозным металлизированным отверстием, должны полностью исключать вероятность повреждения металлического покрытия отверстия и гарантировать достижение максимально возможной герметичной зоны электрического контакта;

— запрессовываемая часть контакта должна иметь заходную часть;

— должны быть предусмотрены элементы для приложения силы запрессовки (например, буртики или подобного рода поверхности).

Запрессовываемой называется особым образом спрофилированная часть контакта, предназначенная для создания соединения, выполненного запрессовкой (прессового соединения). Она играет решающую роль в получении прессового соединения. Размер поперечного сечения контакта в запрессовываемой части должен соответствовать диаметру отверстия, на который данный контакт рассчитан.

Длина запрессовываемой части контакта должна соответствовать толщине печатной платы, в которую устанавливается данный контакт. А поверхность запрессовываемой части контакта должна быть свободна от царапин, загрязнений и коррозии. Запрессовываемая часть контакта может иметь покрытие (олово, олово—свинец, никель, золото, палладий или соответствующие сплавы золота, палладия и никеля) или не иметь его.

Запрессовываемые контакты изготавливаются из медных сплавов: олово—медь (бронза), цинк—медь (латунь) или бериллиевая медь. В зависимости от материала контакта (как и в зависимости от множества различных других факторов) требуются различные силы запрессовки. При этом выбор материала определяется размерами и назначением контактов. Так как все материалы в той или иной степени подвергаются релаксации напряжений,

* Начало см.в № 8 за 2015 г.

необходимо добиваться того, чтобы силы, обеспечивающее соединение, не снижались со временем до величины, провоцирующей неприемлемое повышение контактного сопротивления в соединении. Однако в любом случае материал должен удовлетворять требованиям обеспечения качественного, стабильного электрического соединения.

На продолжительность эксплуатации контактов могут оказывать влияние различные факторы: релаксация материала, коррозия, механическая работа, вибрация. При оценке продолжительности эксплуатации контактов оценивают снижение силы соединения электрического контакта и на основе полученных данных анализируют возможные последствия этого снижения. Компания AMP провела испытания некоторых моделей своих соединителей с упругими контактами. Испытания проводили при температуре 90 °С в течение 120 дней. Критерием отказа считали изменение контактного сопротивления максимум на 0,3 мОм. Анализ результатов показал, что соединители способны работать 10 лет при температуре 64 °С.

Запрессовываемые контакты (в рабочем положении на плате) контролируют визуально и испытывают на изгиб, на силу запрессовки, силу демонтажа, виброустойчивость, контактное сопротивление, электрическую нагрузку при воздействии повышенной температуры.

По особенности конструкции запрессовываемой части различают два вида запрессовываемых контактов — упругие и жесткие.

Жесткий запрессовываемый контакт имеет жесткую часть, участвующую в прессовом соединении. Сила, необходимая для обеспечения запрессовки, создается за счет деформации сквозного металлизированного отверстия печатной платы, в которое устанавливается соответствующий контакт.

Упругий запрессовываемый контакт имеет упругую часть, участвующую в прессовом соединении. Сила, необходимая для обеспечения запрессовки, создается за счет деформации как упругой части контакта, так и сквозного металлизированного отверстия печатной платы, в которое устанавливается соответствующий контакт.

Жесткие запрессовываемые контакты

Жесткие запрессовываемые контакты (рис. 1) в основном применяли на ранних этапах развития технологии запрессовки для механического и электрического соединения нескольких наложенных друг на друга печатных плат. В настоящее время эти контакты практически не используют.

Запрессовка жестких контактов требует точного выполнения размеров контакта в поперечном сечении и диаметра металлизированного отверстия, что особенно трудно. В противном случае не выполняется условие обеспечения пластической деформации и удержания герметичности контактной зоны либо в процессе запрессовки может быть повреждена металлизация в отверстии. Такие допуски нетрудно обеспечить в жестком контакте, но изготовление отверстий с подобными допусками будет достаточно дорогостоящим процессом. Если стоимость в пересчете на один жесткий контакт составляет всего несколько центов, то стоимость в пересчете на одну печатную плату вырастает до сотен долларов.

Недостатки жестких запрессовываемых контактов:

- высокие силы запрессовки;
- отсутствие упругости контакта;
- ослабление полученных соединений со временем;
- необходимость дополнительной пайки для обеспечения высокой надежности;
- возможность повреждения дорогостоящих плат, восстановление которых требует высоких материальных затрат.

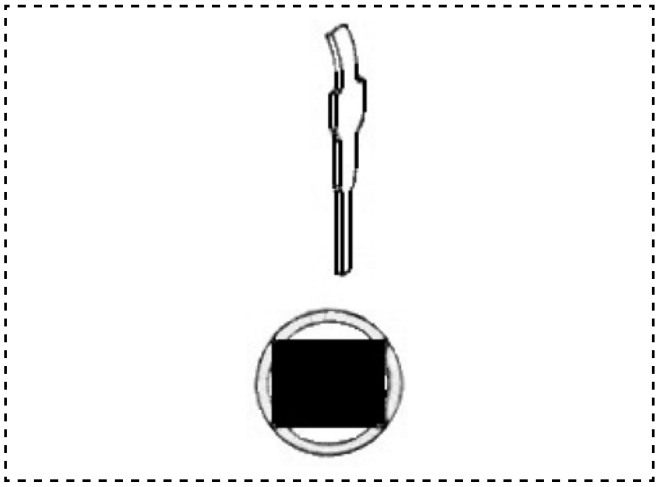


Рис. 1. Жесткий контакт

При использовании жесткого контакта потенциальная энергия упругой деформации полностью запасается на печатной плате. Со временем это приводит к разрушению сквозных металлизированных отверстий. Частота возникновения отказов в платах с установленными компонентами может достигать 50 %. При возникновении большого числа отказов в платах, ремонт становится затруднительным или вообще невозможным.

Для устранения указанных недостатков появились разные конструктивные исполнения запрессовываемых контактов. Эти контакты смогли обеспечить:

- невысокие силы запрессовки;
- отсутствие ослабления соединений;
- возможность использования в условиях, требующих обеспечения высокой надежности (без применения дополнительной пайки);
- исключение возможности повреждения печатной платы (возникновение повреждений только на контакте);
- запас большей части энергии упругости в контакте;
- возможность повторного использования отверстия;
- возможность использования отверстий с широким диапазоном диаметров.

Наиболее полно таким требованиям отвечают упругие запрессовываемые контакты, которые являются логическим продолжением жестких контактов. Применение упругих контактов более перспективно и эффективно.

Упругие запрессовываемые контакты

В случае упругих запрессовываемых контактов в основном деформируется запрессовываемая часть контакта, деформации сквозного металлизированного отверстия, как правило, не возникает, а если и возникает, то она значительно меньше, чем в случае жестких запрессовываемых контактов.

Наиболее известным является конструктивное решение запрессовываемого контакта под названием "игольное ушко" — продольное отверстие в штыре, которое позволяет изменять размер контакта в поперечном сечении и, таким образом, компенсировать излишние силы при запрессовке контактов (рис. 2).

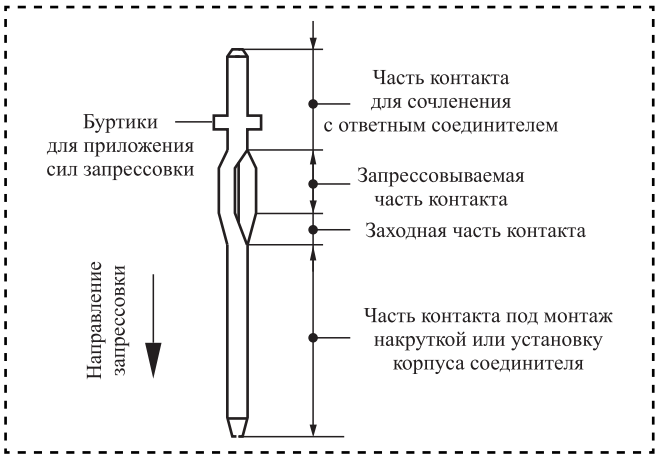


Рис. 2. Конструкция упругого контакта

Основными компонентами конструкции упругих запрессовываемых контактов являются заходная и запрессовываемая части. При запрессовке контакта в соприкосновение со сквозным металлизированным отверстием сначала входит заходная часть, смещающая поверхностный слой покрытия этого отверстия для получения зоны электрического контакта. Запрессовываемая часть, благодаря упругой деформации, адаптируется под диаметр отверстия, не повреждая его. Таким образом, обеспечивается плавный равномерный рост давления на стенки отверстия, а в зоне контакта формируется соединение, аналогичное соединениям, получаемым холодной сваркой.

Упругий контакт образует зону плотного электрического контакта со сквозным металлизированным отверстием, гарантируя долговременное электрическое соединение и механическую надежность.

Разработаны и применяются различные варианты профилей и конструкций запрессовываемой части упругих контактов (рис. 3).

В ходе запрессовки сила воздействия на контакт изменяется.

Процесс захода контакта в отверстие можно разделить на три этапа:

1. Центрирование и размещение (рис. 4).

Центрирование разъемов перед запрессовкой необходимо для предотвращения повреждения как печатной платы, так и самих контактов.

2. Впрессовывание контактов (рис. 5).

В результате контактирующие поверхности освобождаются от изолирующих оксидных

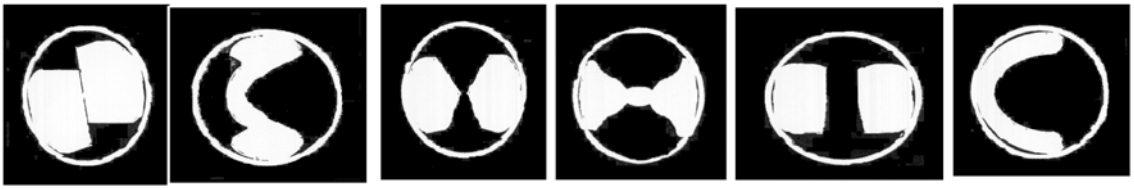


Рис. 3. Разновидности упругих контактов

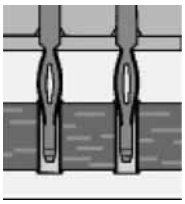


Рис. 4. Центрирование и размещение

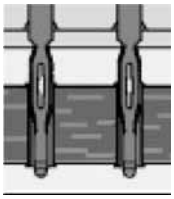


Рис. 5. Впрессовывание контактов

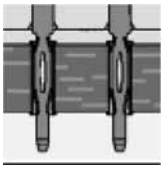


Рис. 6. Допрессовка до конечного положения

пленок. Избыточное покрытие (олово) перемещается вниз по сквозному отверстию. В результате совмещения двух металлических поверхностей без оксидных пленок образуется газонепроницаемое соединение.

3. Допрессовка до конечного положения (рис. 6).

Операция запрессовывания должна быть прекращена как только соединитель займет конечную позицию в плате, чтобы избежать излишнего напряжения сжатия.

Динамика деформации во время запрессовки может быть оценена посредством измерения степени сжатия запрессовываемой части при приложении определенной силы. Сначала сила растет довольно резко из-за проникновения в отверстие заходной части и смещения поверхностного слоя покрытия в отверстии (рис. 7). Затем кривая принимает устойчивое горизонтальное положение, свидетельствуя о том, что для дальнейшего сужения поперечного сечения запрессовываемой части необходима меньшая сила. Такая динамика особенно желательна для предотвращения повреждения сквозного металлизированного отверстия.

Существует множество тестов, позволяющих оценить характеристики и поведение запрессовываемой части во время запрессовки. Эти тесты или основываются на стандартных программах испытаний (в стандартах DIN 41611, часть 5 и IEC 352-5), или разрабатываются самими фирмами-производителями.

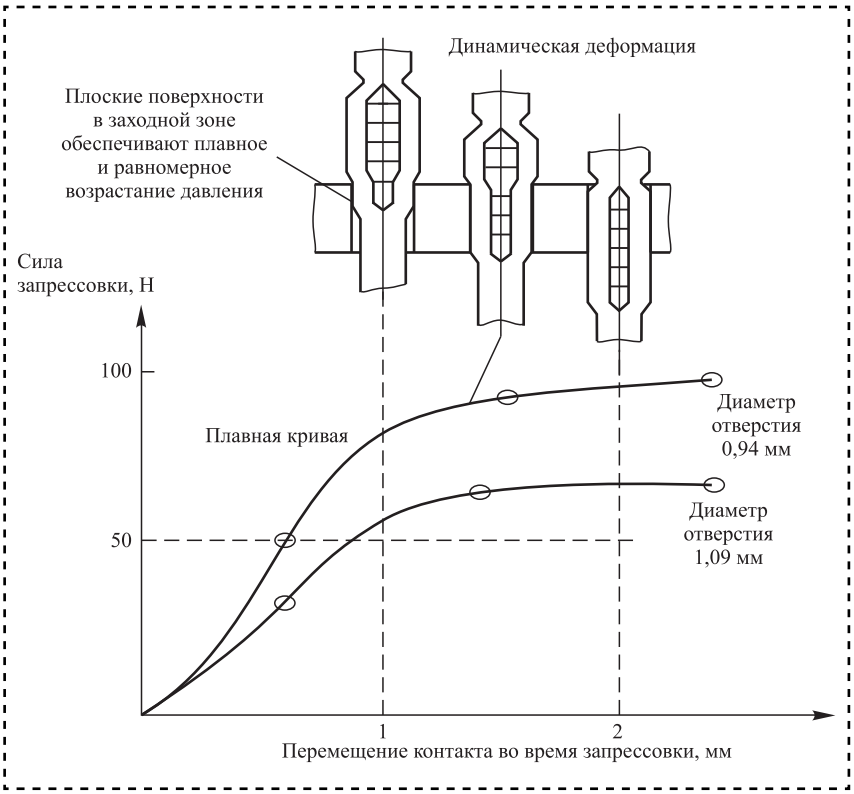


Рис. 7. Силы запрессовки на различных этапах (контакт фирмы Conec)

Упругие запрессовываемые контакты (в отличие от жестких контактов) имеют следующие достоинства:

- большая герметичная зона контакта;
- высокая надежность благодаря запасенной энергии;
- отсутствие повреждения сквозного металлизированного отверстия во время эксплуатации;
- повышенное удобство применения при работе с многослойными печатными платами;
- меньшая себестоимость изготовления печатных плат благодаря большим допускам на отверстия;
- возможность монтажа контактов (и компонентов с этими контактами) самим конечным потребителем.

Особенности конструкции печатной платы

Технология запрессовки определяет некоторые особенности материалов, конструкции и размеров печатных плат.

Печатные платы изготавливаются из стеклоэпоксида типов G10, G11, FR5 (стандарт NEMA), типа Hgw (стандарт DIN 7735) и типа EP (стандарт DIN 40802), имеют сквозные металлизированные отверстия и соответствуют стандартам IEC 326-3, IEC 326-5 и IEC 326-6.

Базовый материал (материал подложки) печатных плат должен соответствовать следующим стандартам:

а) двусторонние печатные платы:

— IEC 249-2-4, тип 249-2-4-IEC-EP-GC-CU;

— IEC 249-2-5, тип 249-2-5-IEC-GC-CU;

б) многослойные печатные платы:

— IEC 249-2-11 249-2-11-IEC-EP-GC-CU;

— IEC 249-2-12 249-2-12-IEC-EP-GC-CU.

Номинальная толщина печатных плат составляет 1,5...6,4 мм (толщина плат не должна быть менее 1,5 мм, так как эта величина определяет рекомендуемую стандартами минимальную эффективную длину запрессовки 1,3 мм).

Каждый тип соединителя рассчитан на определенную минимальную толщину печатной платы. Как правило, соединители, рассчитанные на печатные платы толщиной 1,6 мм, могут также использоваться и для установки на более толстые платы (благодаря допуску 10 %). Для печатных плат номинальной толщиной 2,4 мм и выше требуются специальные типы соединителей потому, что:

— в соответствующим образом спроектированной печатной плате механическая надежность соединения, выполненного запрессовкой, намного выше, чем надежность соединений для плат толщиной 1,6 мм (например, сила демонтажа свыше 44 Н по сравнению с 30 Н);

— соединители данного типа не в состоянии изогнуть более тонкие печатные платы в случае монтажа высокой плотности (например, в случае использования контактов под монтаж накруткой между соединителями).

Особенности конструкции сквозных металлизированных отверстий

Печатные платы должны изготавливаться с соблюдением требований на структуру сквозных металлизированных отверстий, изображенную на рис. 8.

Сквозные металлизированные отверстия выполняются с контактными площадками, которые повышают механическую стойкость внутреннего покрытия. Сквозные металлизированные отверстия без контактных площадок могут быть восприимчивы к повреждению, например покрытия.

Требуемая толщина медного покрытия в сквозных металлизированных отверстиях под запрессовку превышает величину аналогичного параметра в случае отверстий под пайку. Однако и допуски на эту толщину выше (25...75 мкм). Слишком тонкие слои медного покрытия могут привести к увеличению сил запрессовки.

При нанесении свинцово-оловянного покрытия важно избегать получения слишком толстого слоя, так как его частицы будут вытесняться из отверстия запрессовываемым контактом. Как правило, это покрытие присутствует как на самих платах, так и в их отверстиях, играя роль защитного, а при запрессовке — "смазочного" покрытия. В процессе формирования металлизированного отверстия при необходимости свинцово-оловянное покрытие может и не наноситься (в таком случае это будет чисто медненое отверстие).

Внутреннее (оловянное или свинцово-оловянное) покрытие отверстий в печатных платах может быть нанесено гальваническим методом

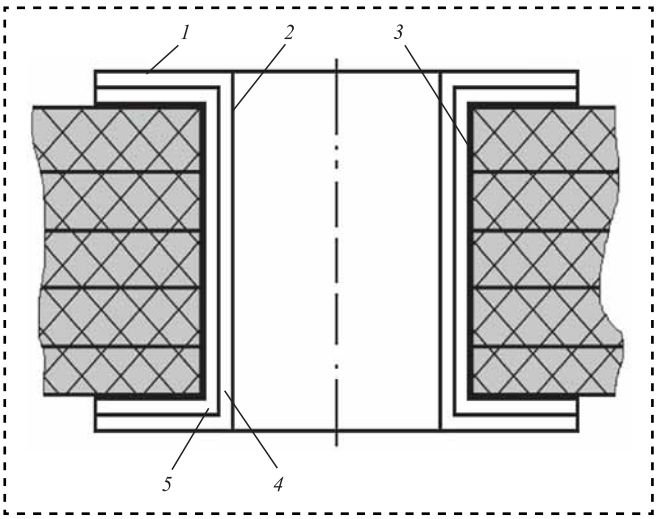


Рис. 8. Структура сквозного металлизированного отверстия: *1* — контактная площадка; *2* — отверстие после сверления; *3* — сквозное металлизированное отверстие; *4* — покрытие олово—свинец; *5* — медное покрытие

или методом оплавления. Предпочительным является гальванический метод. В процессе гальванического нанесения свинцово-оловянного покрытия осаждение происходит более интенсивно на краях отверстия, а не по середине (имеется в виду не диаметр, а глубина отверстия). Во время оплавления (которое используется во многих процессах изготовления печатных плат из-за расположенных на поверхности элементов) профиль свинцово-оловянного покрытия в отверстии определяется силами поверхностного натяжения расплавленного свинцово-оловянного покрытия, приводящими к получению более толстого слоя в середине отверстия.

Рекомендации по изготовлению отверстий из каталога фирмы Harting

Печатная плата с покрытием	Толщина покрытия, мкм	Диаметр отверстия с металлизацией, мм
Олово—свинец (EN 60 352-5)	Sn ⩽ 15 мкм	0,94...1,09
Олово—свинец (химическое)	Sn ⩾ 0,8 мкм	1,00...1,10
Золото—никель	Ni = 3...7 мкм; Au = 0,05...0,12 мкм	
Серебро	Ag = 0,1...0,3 мкм	
Медь	Cu ⩾ 25 мкм	
Примечание. Диаметр отверстия без металлизации (1,15 ± 0,025) мм; толщина медного покрытия ⩾25 мкм; толщина печатной платы ⩾ 1,6 мм.		

Технология запрессовки требует не только обращать внимание на конечный диаметр отверстия в печатной плате (что обычно и делается при реализации паяных соединений), но и требует назначать и соблюдать определенные допуски на всю структуру отверстия. Это касается и диаметра отверстия после сверления, и толщины медного покрытия, и толщины свинцово-оловянного (припойного) покрытия, т.е. всех размеров, формирующих диаметр конечного отверстия, на который тоже назначаются допуски (таблица).

При формировании отверстия под запрессовку диаметр отверстия после сверления больше, чем при получении металлизированного отверстия под пайку. Данный диаметр является основным параметром, оказывающим максимальное влияние на силы запрессовки и выпрессовки (демонтажа).

Число параметров структуры отверстия превышает число параметров, обычно учитываемых при работе с платами, рассчитанными на пайку. Однако это обстоятельство ни коим образом не усложняет процесс формирования отверстий под запрессовку, так как для получения заданных номиналов и допусков конечных отверстий достаточно строгого соблюдения допусков, назначаемых на различных этапах формирования конечного отверстия.

Величина допуска на отверстие после сверления не позволяет выполнять групповое сверление большого числа печатных плат за один установ.

Библиографический список

1. **Helster D., Fedder J.** New press-fit technology challenges SMT electrical performance leadership // Connector Specifier. 2009.
2. **HARTING** Connectors DIN 41612.
3. **Corman N., Myers M., Copper C.** Friction behavior of press-fit applications: test apparatus and methodology // Proceedings of the 49th IEEE Holm Conference on Electrical Contacts. 2003.
4. **IEC 60352-5.** Solderless Connections. Part 5: Press-in connections. General requirements, test methods and practical guidance, Edition 3.0, 2008-01.
5. **Плотников Ф.Г.** Непаяные соединения, выполняемые запрессовкой — новый класс соединений на российском рынке электронной техники // Компоненты и технологии. 2001. № 1.
6. **Медведев А.М.** Сборка и монтаж электронных узлов // М.: Техносфера. 2007. 257 с.
7. **Медведев А.М.** Соединения типа press-fit // Компоненты и технологии. 2006. № 8.
8. **Степанова М.А.** Соединения типа press-fit (аналитический обзор) // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 8 (181).

(Продолжение следует)

УДК 681.2-52

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

Аппаратно-программный комплекс автоматизированного неразрушающего контроля физико-механических свойств изделий

Разработана схема аппаратно-программного комплекса автоматизированного неразрушающего контроля свойств материалов и система определения параметров пористости материалов.

The scheme of hardware-software complex automated non-destructive testing of material properties is developed. The system of parameters of porosity of materials is developed.

Ключевые слова: автоматизированный, неразрушающий, контроль, пористость, газодинамический метод.

Keywords: computerized, non-damaging, control, porosity, gas-dynamic method.

Современный уровень развития машиностроительной отрасли предъявляет жесткие требования к технологии изготовления изделий машиностроения и контролю их качества, поэтому разработка средств автоматизированного неразрушающего контроля качества изделий является актуальной задачей. Только в Российской Федерации насчитывается более 50 компаний, занимающихся изготовлением приборов для неразрушающего контроля (таблица).

Однако ни одно из известных устройств не позволяет осуществлять одновременный контроль физических (пористость) и механических (твердость, прочность, теплопроводность) свойств материалов.

Разрабатывается конкурентоспособный аппаратно-программный комплекс производительного и высокоточного экспресс-контроля свойств изделий из пористых материалов.

Приборы неразрушающего контроля

Прибор, марка	Изготовитель	Конкурентные преимущества
Ультразвуковой дефектоскоп УД2-70	Россия, Саратов, компания "Техно-НДТ"	Контроль форм и размеров дефектов, пористости
Динамический твердомер ТЭМП-4		Контроль твердости
Рентгеновский аппарат "Ратмир-250"	Россия, Москва, компания "Промышленный контроль"	Контроль дефектов
Рентгеновский аппарат SITE-X	Бельгия, компания "ICM"	Контроль дефектов
Измеритель прочности бетона ОНИКС-2.5	Россия, Самара, ЗАО "Геострой-изыскания"	Контроль прочности бетона

Принцип работы комплекса основан на газодинамическом методе контроля, в основе которого лежит математическая модель течения газа через контролируемый пористый материал. Пористость является параметром, характеризующим как структуру материала, так и определяющим его механические свойства.

Аппаратно-программный комплекс (рис. 1) содержит установленную на контролируемом изделии измерительную камеру *1*, образующую с изделием под воздействием силы *Q* герметичные полости *2*, соединенные посредством системы трубопроводов *3* с вакуумным насосом *4* для откачки воздуха из полостей *2*. Для исключения перетечки газа между полостями *2*, каждая из них имеет возможность отключения от общей магистрали трубопроводов посредством клапанов *5* и от вакуумного насоса *4* клапаном *6*. Каждая полость *2* имеет выход на датчики давления газа *7*, информация с которых автоматически через блок управления системы контроля *8* передается на ЭВМ *9*, снабженную встроенным датчиком времени. Измерительная камера *1* снабжена датчиком температуры *10*, который подключен к ЭВМ *9*. Для обеспечения направленного потока газа через контролируемый материал, на поверхности изделия, противоположной поверхности с установленной на ней измерительной камерой *1*, располагают рабочую камеру *11*, образующую с контролируемым изделием под воздействием силы *Q* герметичную полость *12*. Полость *12* соединена через систему трубопроводов *3* и клапан *5* с вакуумным насосом *4*. Кроме того, полость *12* имеет выход на датчик давления газа *7*, информация с которого автоматически через блок управления системы контроля *8* передается на ЭВМ *9*. Для подключения к атмосфере рабочей камеры *11* служит клапан *13*.

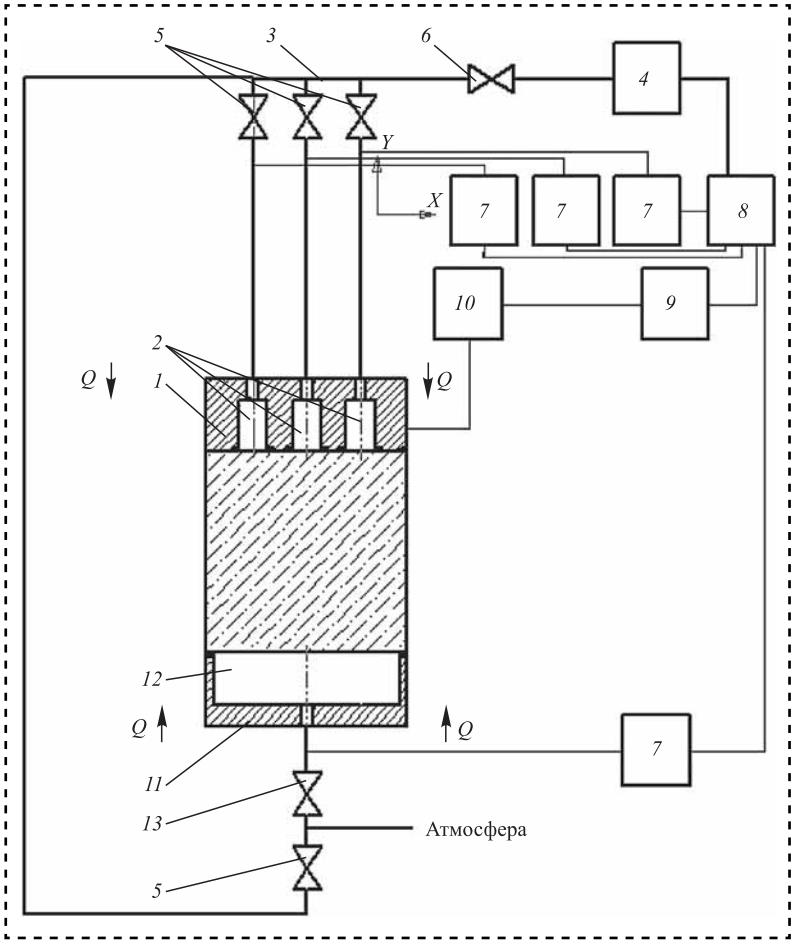


Рис. 1. Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров пористости:

1 — измерительная камера; *2*, *12* — газовые полости; *3* — система трубопроводов; *4* — насос; *5*, *6*, *13* — клапаны; *7* — датчик давления; *8* — блок управления системы контроля; *9* — ЭВМ; *10* — датчик температуры; *11* — рабочая камера

На контролируемое изделие устанавливают одну или несколько измерительных *1* и рабочую *11* камеры, включается ЭВМ *9*. Система управления *8* автоматически открывает клапаны *5*, *7*, включает насос *4* и происходит откачка воздуха из полостей *2*, *12*. Как только датчики давления *7* покажут наличие вакуума в полостях *2* и *12* информация передается на блок управления системы контроля *8* и ЭВМ *9*. Блок управления системы контроля *8* отключает насос *4* и перекрывает клапаны *5*, *6*, открывает клапан *13*. Начинается течение газа из атмосферы в полость *12* рабочей камеры *11* и через контролируемый материал — в полости *2* измерительной камеры *1*. На ЭВМ *9* запускается программное обеспечение построения зависимости изменения давления в полостях *2* с течением времени. Датчик температуры *10* передает информацию о температуре в камере *1* на ЭВМ *9*, которая строит графические зависимости изменения давления газа в полостях *2* от времени (рис. 2), а за-

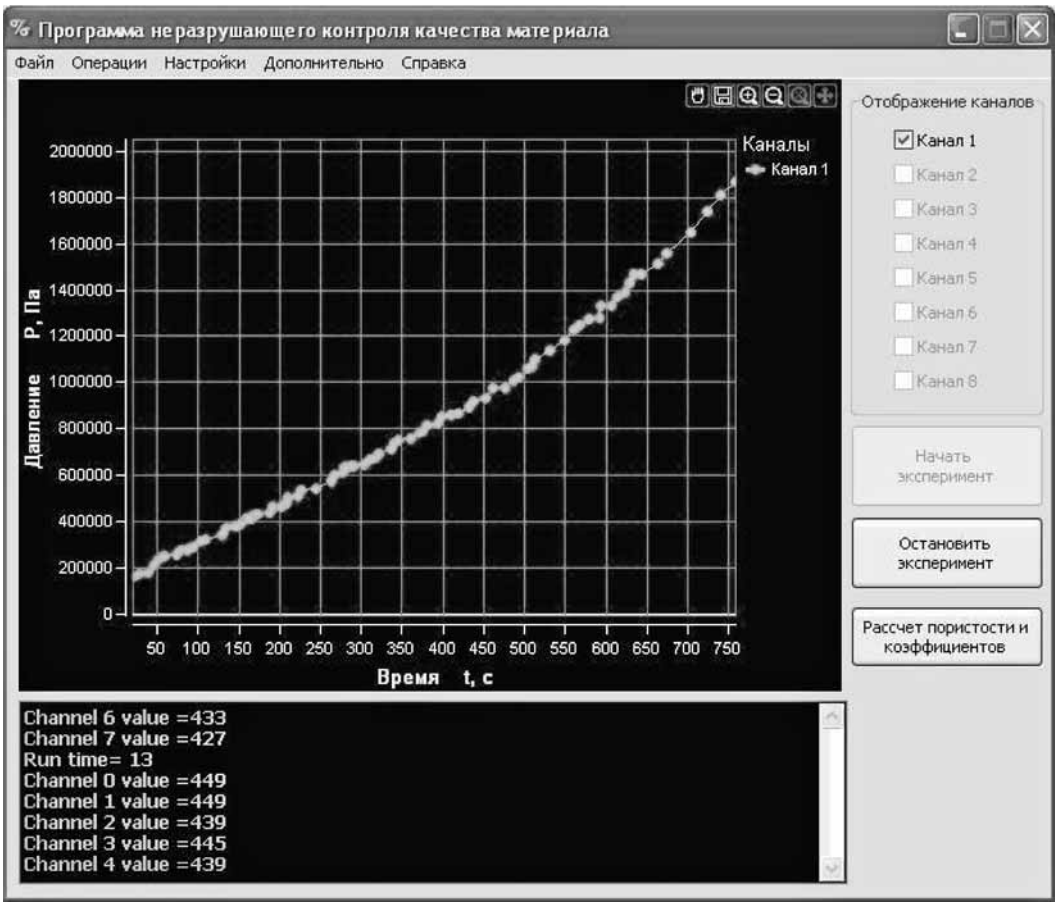


Рис. 2. Зависимость давления в полости *2* от времени

тем определяет параметры поровой структуры материала и механические свойства. Для исключения потока газа через боковые поры при установке на изделие одной измерительной *1* и одной рабочей *11* камер свободные грани изделия изолируют.

Точность фиксирования поступающих с датчиков давления *7* сигналов обеспечивается блоком управления системы контроля, который позволяет осуществлять автоматическое управление работой вакуумного насоса *4*, обработку сигналов от датчиков давления *7*, управление работой клапанов *5*, *6*, *13*. Управляющей системой верхнего уровня является ЭВМ *9*.

Блок управления (рис. 3) работает следующим образом. Питание блока подается на разъем XT4 от отдельного стабилизированного источника. После подачи питания заряжается конденсатор C3, что приводит к запуску микроконтроллера U1. Далее микроконтроллер по последовательному каналу связи устанавливает соединение с персональным компьютером. Последовательный канал дуплексный, организован на микросхеме MAX 232 (U2). После получения от пользователя системы начальных установок включается индикатор HL1, и контроллер ожидает нажатия кнопки SA3.

Кнопка SA3 открывает клапаны *5*, *6*, подключаемые к разъему X3, согласование уровней напряжения питания клапанов и контроллера обеспечивается микросхемой U3. Далее на разъеме XT5 формируется сигнал "Насос пуск" и запускается в работу частотный преобразователь привода вакуумного насоса *4*. Состояние работы насоса *4* отслеживается по сигналу "Авария насоса", появление которого приводит к остановке программы и включению индикатора HL2 в мигающем режиме.

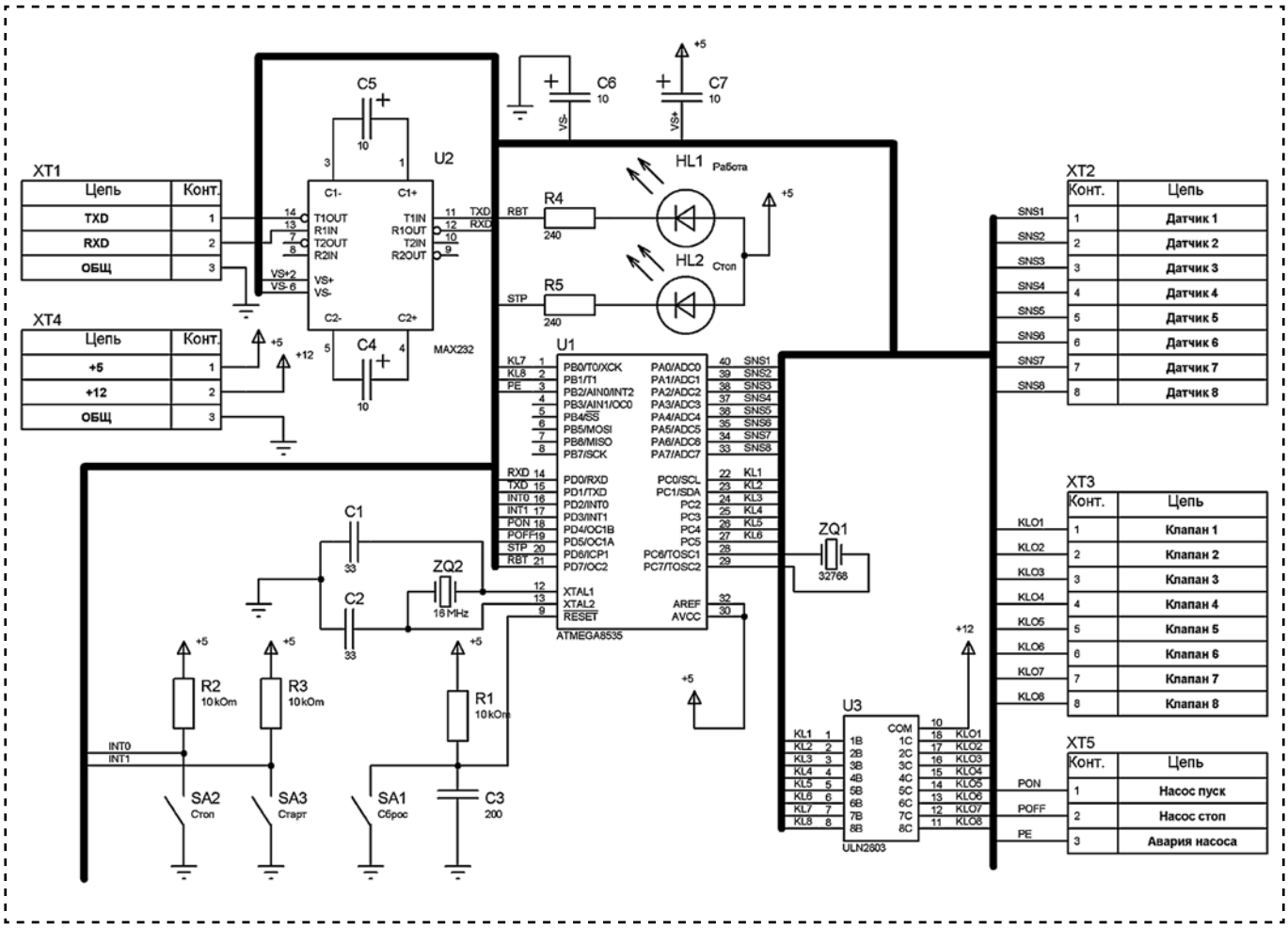


Рис. 3. Электрическая принципиальная схема блока управления

После достижения заданного уровня вакуума, фиксируемого датчиками *7*, подключаемыми к разъему XT2 насос *4* останавливается, а микроконтроллер переводится в режим измерения нарастания давления. Данные измерений выдаются в последовательный порт.

В штатном режиме программа измерений останавливается по достижению определенного давления в выбранной камере либо по окончанию времени измерения.

Съем данных осуществляется автоматически программным обеспечением для построения графических зависимостей изменения давления в полостях *2* с течением времени.

Таким образом, предлагаемый аппаратно-программный комплекс автоматизированного неразрушающего экспресс-контроля физико-механических свойств изделий из пористых материалов, таких как металлокерамика, пластик и др., обеспечивает оперативный контроль пористости, прочности и других свойств пористых материалов изделий машиностроения с высокой точностью измерений.

Библиографический список

1. **Можегова Ю.Н.** Точность автоматизированного контроля пористости материалов газодинамическим методом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 1. С. 14—16.

2. **Можегова Ю.Н., Марихов И.Н.** Точность автоматизированного контроля параметров пористости материалов газодинамическим методом // Контроль. Диагностика. 2015. № 1. С. 72—78.

3. **Матросова Ю.Н., Лапыгин Д.А.** Автоматизированная система контроля параметров изделий перед сборкой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 12. С. 34—37.

УДК 658.52

Ю.В. Иванов, *д-р техн. наук*
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
E-mail: yvivanov@bmstu.ru

Метод синтеза компьютерного проектирования техпроцессов и структур роботизированных комплексов сборки электронных изделий в многономенклатурном производстве

Разрабатываемый метод синтеза должен удовлетворять требованиям, предъявляемым в процессе сборки электронных модулей (ЭМ) в роботизированном комплексе, среди которых гибкость, учет особенностей изделий и сборочной производственной среды, проектирование индивидуального техпроцесса сборки и многовариантное проектирование на основе базовых элементов-признаков. Использование признаков отличает предлагаемый метод от существующих, обеспечивает многовариантное проектирование и делает возможным совершенствование изделий ЭМ и производственной среды. Метод применим для синтеза техпроцессов и роботизированных сборочных комплексов многономенклатурной сборки электронных модулей.

Development method of synthase must be require next demands: require of assembly electronic modules in robotic complex among which flexibility, accounting devises specials and productions complex, designing individual technological process of assembly and multivariate design based on base element. Using signs differ method of existing provides multivariate designing and make possible improvements electronic devises and production. Method apply for synthase technological process and robotic assembly complex in multinomenclature assembly of electronics modules.

Ключевые слова: эффективность, комплексность, синтез, надежность, производительность, стоимость.

Keywords: efficiency, complex, reproduce, synthesis, hope, reliability, produce, productivity, cost.

Введение

Широкое распространение электронной аппаратуры (в том числе электронных модулей) в народном хозяйстве и военной технике требует автоматизации их производства. Хотя автоматизация многономенклатурного производства ЭМ [1], которое составляет по статистике более 80 %, вызывает трудности. Здесь наиболее перспективна сборка в роботизированных комплексах, например (гибких автоматизированных сборочных комплексах ГАСК). Проектирование и распространение ГАСК сдерживается неподготовленностью ЭМ к сборке и отсутствием научных основ проектирования ГАСК.

Как показали исследования автора, проектирование ГАСК и его элементов должно быть комплексным, компьютерным, многовариантным, оптимальным. Для этого нужны методы синтеза, технико-экономического анализа, оптимизации, точности, надежности, производительности, стоимости.

Цель. Разработка для компьютерного проектирования автоматизированных технологических процессов (АТП) и структур роботизированных комплексов (РК) сборки электронных модулей в многономенклатурном производстве методов синтеза, позволяющих не только спроектировать индивидуальные АТП и структуры РК, но и построить их оптимально.

Рассмотрим методы синтеза. Другие методы компьютерного проектирования АТП и ГАСК (методы технико-экономического анализа,

оптимизации, определения и обеспечения точности, надежности, производительности и стоимости) будут рассмотрены отдельно.

Объектами проектирования являются автоматизированные технологические процессы сборки ЭМ в многономенклатурном производстве, структуры роботизированных комплексов (ГАСК) и их элементы.

Объектами производства служат электронные изделия, представляющие собой сборку печатной платы с навесными электронными компонентами (ЭК). Электронными компонентами являются SMD компоненты, микросхемы с планарными выводами и DIP компоненты. Базовыми элементами проектируемых объектов является набор признаков (шаблоны для типовых объектов и модели для индивидуальных объектов).

Постановка задачи. Разрабатываемый метод синтеза должен отвечать следующим требованиям:

обеспечить возможность проектирования для каждого типа изделия ЭМ индивидуального объекта (техпроцесса, структуры ГАСК), создания множества объектов, просмотра каждого варианта из множества в пакетном режиме;

быть универсальным (для большого числа типов объектов);

иметь минимальный размер базового элемента;

обеспечить простую формализацию и реализацию;

учитывать условия производства, конструкторско-технологические особенности изделий ЭМ, автоматизированного технологического оборудования (АТО), оснастки (СТО).

В изделиях необходимо выделить тип, число, расположение электронных компонентов, вид их монтажа. В промышленных роботах и технологических автоматах необходимо учесть тип, вид сборочных головок; накопителей компонентов, плат; в технологической оснастке СТО — вид захватных устройств.

Обзор известных методов

В машино- и приборостроении [2—5] при разработке техпроцессов изготовления деталей применяют следующие методы управления и проектирования АТП [5]:

управления АТП;

вариантное планирование;

адаптивное планирование;

новое планирование АТП.

Выбор метода зависит от типа изделий, объема их выпуска, номенклатуры, технологических особенностей производства.

Для метода управления АТП важным является организация хранения информации о технологических маршрутах. Выбор маршрута для конкретных условий производства зависит от того, насколько подходит он к требованиям заказа. Метод не позволяет проектировать новый техпроцесс.

При применении метода повторного планирования учитывают реальные условия заказа. Метод не проектирует новый техпроцесс. Даже при повторяемости деталей область его применения является ограниченной.

Для метода вариантного планирования необходимо наличие типового технологического маршрута для каждого класса деталей в данном производстве. В каждом классе определяется типовой представитель деталей. Для него разрабатывается типовой маршрут обработки. Для конкретной детали этого представителя выбирается вариант типового маршрута, являющийся его подмножеством.

В вариантном планировании есть возможность корректировки параметров типового маршрута в определенных границах, что снижает степень гибкости техпроцесса АТП. Нельзя этим методом спроектировать новый техпроцесс. Метод вариантного планирования наиболее подходит для предприятий с ограниченной номенклатурой.

Для метода адаптивного планирования характерно наличие множества разработанных технологических маршрутов, которые могут быть подогнаны к конкретным требованиям заказа. Адаптивное планирование (по сравнению с методами повторного и вариантного планирования) требует дополнительных технологических данных. Эффективность этого метода может быть увеличена, если подбор технологических маршрутов выполнять с помощью специального классификатора.

Таким образом, перечисленные методы не позволяют спроектировать новый техпроцесс, поэтому для автоматизации многономенклатурного производства ЭМ не подходят.

Большие возможности по разработке технологических маршрутов появляются с применением метода нового планирования (традиционного метода синтеза). Базовыми элементами в нем при проектировании техпроцесса являются деталеоперации.

Суть метода сводится к описанию детали и технологических требований, предъявляемых к ее обработке. Анализ этих требований позволяет определить возможные решения технологических задач в соответствии с определенными критериями. В этом методе учитываются конструкторско-технологические особенности собираемых изделий и производственной среды (АТО, ПР, СТО). Его реализация возможна на ЭВМ. С помощью данного метода можно изменить структуру АТП. Сложность формализации метода — высокая.

При проектировании индивидуального техпроцесса технолог, руководствуясь критерием (или критериями), особенностями изделия и возможностями производственной среды, принимает или отвергает предлагаемые ЭВМ варианты. В результате остаются один или два варианта АТП. Для многовариантного проектирования АТП метод тоже не подходит.

Основные результаты, обоснование и доказательства

Проектирование технологических процессов и структур автоматизированных сборочных комплексов (АСбК) проводится в настоящее время по двум основным направлениям.

Первое направление — традиционное [1, 2, 5] — предполагает выделение по какому-либо критерию из обобщенного технологического маршрута одного, ориентированного на конкретное изделие.

Формализованное описание изделия и техпроцесса его изготовления в этом случае представлено *конструкторско-технологическим банком данных* (КТ БД). В нем данные распределены в пространстве и времени, но не связаны между собой (не структурированы). Для данного направления характерны методы подобия (заимствования), вариантный, адаптивный.

Малоэффективны для ГАСК известные методы синтеза, построенные на использовании атрибутов-аналогов (деталеопераций). Они сложны в применении, требуют разработки предметно-ориентированного языка и позволяют создать лишь один новый АТП, который можно оптимизировать по выбранному критерию (параметрическая коррекция).

Второе направление — предлагаемый метод [3, 4] — отличается от первого применением синтеза на основе структурированной *конструкторско-технологической базы знаний* (КТ БЗ) для конкретной предметной области.

Структурирование осуществляется следующим образом. Каждый элемент базы знаний расчленяется на составные части-атрибуты (признаки) с установлением структурных связей между ними. Это позволяет в процессе проектирования генерировать множество вариантов АТП и структур автоматизированных сборочных комплексов (АСбК), выбрать лучший вариант, а также оптимизировать его параметры.

Для предложенного метода на основе формализованного описания изделия (в КТ БЗ данные структурированы) процесс автоматизированного проектирования заключается в отображении структурных связей между изделием и содержимым базы знаний по определенным правилам данной предметной области (например, "Сборка ЭМ").

Разработаны правила для обработки результатов конструкторско-технологического анализа ЭМ, АТП, АСбК; классификации изделий и технологической сборочной среды; формализации при построении моделей; работе с базой знаний.

При обработке результатов конструкторско-технологического анализа изделий ЭМ, АТП и АСбК происходит выделение типовых объектов сборки, определение множества их существенных характеристик и выявление структурных иерархических связей.

При классификации изделий, компонентов, технологической среды (автоматизированных технологических операций (АТОП), техпроцессов, комплексов, оборудования, оснастки) определяются и рассматриваются классификационные признаки. Множества объектов распределяются по признакам; выделяются иерархические связи.

На этапе формализации метода синтеза АТП и структур ГАСК происходят, во-первых,

разработка формализованных правил определения признаков переходов, операций, подструктур, структур ГАСК; во-вторых, построение структурированных запросов к базе знаний, реализующих разработанные правила; в-третьих, разработка алгоритмов проектирования элементов АТП и структур ГАСК, объединяющих множество соответствующих правил проектирования в соответствии с реализуемым методом.

Правила работы с КТ БЗ содержат разработку терминов реляционных баз данных; организацию процедур преобразования информации; программную реализацию метода проектирования АТП; установление необходимых связей таблиц друг с другом; индексацию полей таблиц и др.

Правила проектирования АТП, структур ГАСК и их элементов содержат общие правила и правила разработки их шаблонов и моделей. При этом формируется некоторое множество технологических маршрутов, из которого можно выбрать один, в большей степени удовлетворяющий какому-либо критерию или критериям. Малая величина базовых элементов (признаков) делает этот метод более эффективным при выполнении процесса проектирования, так как при этом генерирует не один, а целое множество альтернативных вариантов АТП на каждом этапе проектирования с возможностью их последующего сравнения и оптимального выбора.

Преимуществом данного метода также является возможность выполнить как параметрический (например, при оптимизации очередности установки компонентов ЭК на плату), так и структурный синтез (например, при обеспечении максимальной концентрации разнотипных компонентов) на одном рабочем месте.

Каждый объект, участвующий в проектировании АТП и структуры ГАСК (например, переход, операция, подструктура, структура), является формализованным описанием множества признаков, связанных определенной системой отношений. Множества признаков объектов делятся на шаблоны и модели.

Шаблон описывает типовой объект множества, его характеристики, положение и связи в общей иерархии.

Модель представляет множества признаков индивидуального объекта, определяющего качественные и количественные значения его характеристик, положение и связи в общей иерархии.

Признаки объекта подразделяются на группы:

признаки-отношения, отражающие структурные связи описываемого объекта с другими объектами, представляются целыми числами-идентификаторами;

признаки-наименования присваивают имя объекту, представляются строковыми переменными;

качественные признаки определяют набор характеристик объекта, записываются логическими переменными;

количественные признаки отражают характеристики объекта, записываются действительными или целыми числами.

Использование множеств признаков при разработке объектов позволяет следующее:

осуществить структурирование данных в виде конструкторско-технологической базы знаний;

установить четкую иерархию связей между объектами;

сократить объем используемого дискового пространства для хранения информации (из-за отсутствия дублирования признаков множества моделей объектов, созданных на базе одного шаблона);

составить формализованное описание процесса проектирования индивидуальных АТП и структур ГАСК на основе групповых АТП и унифицированных структур.

Целесообразно для каждого из перечисленных признаков выделить отдельный шаблон и связать его системой отношений (рис. 1) (шаблоны изображены прямоугольниками

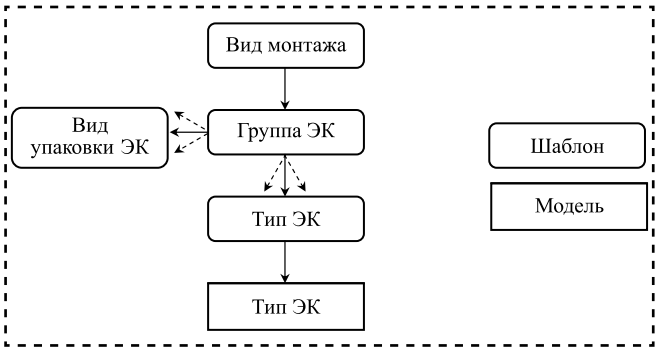


Рис. 1. Связь между шаблонами и моделями сборочных компонентов

с закругленными углами, модели — прямоугольниками).

В формализованном описании за отношения между указанными шаблонами отвечают следующие признаки. Например, в шаблоне вида монтажа компонентов ЭК — идентификатор шаблона вида монтажа ЭК; множество идентификаторов шаблонов групп ЭК, соответствующих данному виду монтажа.

Компоненты ЭК различных групп могут существенно отличаться по геометрии, расположению и форме выводов и т.д. Вследствие этого необходимо для каждой группы определить набор применяемых геометрических параметров. Так, в шаблоне группы ЭК — это набор возможных характеристик компонента ЭК данной группы (диаметры корпуса и выводов, длина корпуса, ширина вывода и др.).

Этого набора шаблонов недостаточно для проектирования ГАСК, так как в нем отсутствуют конкретные качественные и количественные параметры печатной платы (ПП) и других ЭК изделия ЭМ. Эти параметры появятся при разработке моделей типов ЭК, ПП, ЭМ (рис. 2).

Модель типа ЭК конкретизирует один из типов компонентов ЭК изделия ЭМ. Отношения с соответствующими шаблонами задаются с помощью признаков — идентификаторов шаблона типа ЭК (обратная связь с шаблоном типа ЭК, а через него — с шаблонами группы ЭК и вида монтажа ЭК). При этом однозначно определяются тип ЭК, группа ЭК и вид монтажа ЭК.

Расположение компонентов ЭК на ПП определяется признаками — углом и координатами центра симметрии ЭК по осям *X* и *Y*.

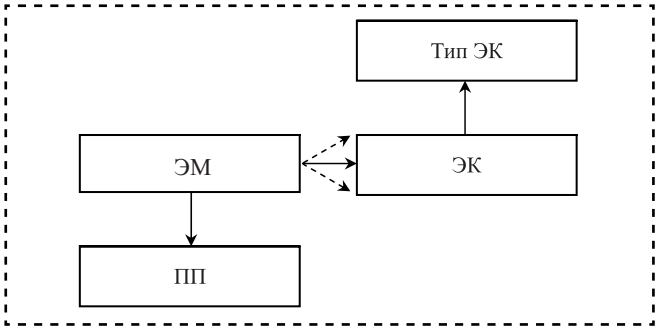


Рис. 2. Связь между шаблонами и моделями сборочных компонентов и сборочных единиц

Модель платы задается длиной, шириной, координатами и диаметром базовых отверстий.

Модель изделия ЭМ строится на основе приведенных моделей компонентов ЭК и ПП.

Обсуждение основных результатов

1. Указанный набор признаков рассмотренных шаблонов и моделей является для компьютерного проектирования необходимым и достаточным, так как позволяет без применения дополнительных признаков однозначно определить шаблоны переходов, операций и подструктур ГАСК для данного типа компонента ЭК. С его помощью можно проверить применимость оборудования АТО и оснастки СТО для реализации операций над конкретными компонентами ЭК; определить оптимальную последовательность монтажа ЭК; получить необходимый и достаточный набор параметров ЭК и изделий ЭМ для расчета эффективности операции $P_{оп}$ и формирования программ пользователя для станков с числовым программным управлением ГАСК.

2. Элементы АТП сборки изделий ЭМ (переходы, операции, подструктуры, структуры ГАСК) согласно методологии проектирования ГАСК разрабатываются в несколько этапов [3, 4]. При этом выполняется полная декомпозиция АТП (до переходов включительно). Поэтому целесообразно строить структуру шаблонов и моделей элементов АТП в виде уровней проектирования с наложением иерархических связей между ними. Каждому уровню соответствует свой элемент АТП (переход, операция и т.д.).

Схема, отражающая связи между элементами АТП, показана на рис. 3.

Шаблоны элементов АТП отвечают за связи уровней проектирования между собой; а также за связи каждого уровня с оборудованием АТО, оснасткой СТО, сборочными компонентами и изделием.

Шаблоны не несут конкретных качественных и количественных признаков элементов АТП. За конкретизацию признаков здесь, как и во всех остальных случаях, отвечают модели элементов АТП. Например, в шаблоне перехода — идентификатор шаблона вида монтажа ЭК, устанавливаемого на данном переходе.

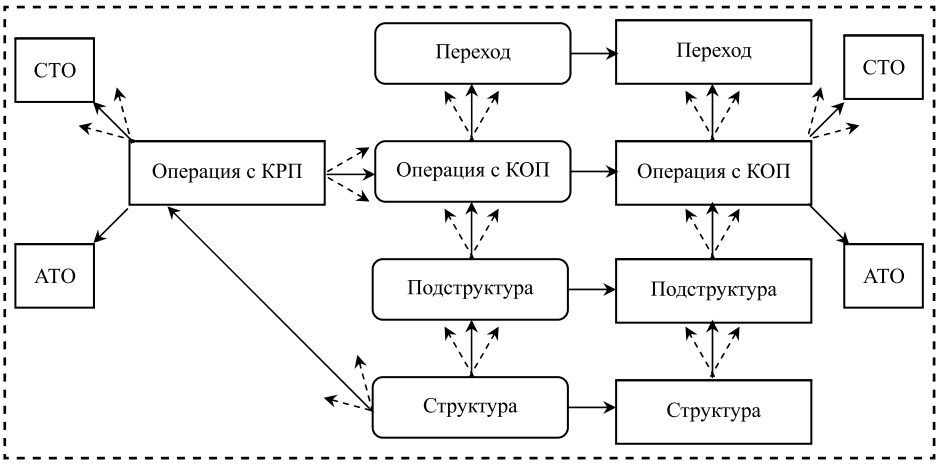


Рис. 3. Связь между шаблонами и моделями элементов техпроцесса сборки изделий ЭМ

Шаблон структуры ГАСК не связан с шаблонами предыдущего иерархического уровня — шаблонами подструктур. Связь между ними устанавливается только на этапе проектирования ГАСК.

В шаблон структуры ГАСК входят лишь качественные признаки, определяющие компоновку оборудования и транспортные операции (множество идентификаторов шаблонов систем массового обслуживания определяют вариант с самоходными тележками, подвесными или напольными промышленными роботами).

Модели элементов техпроцесса АТП построены на базе соответствующих шаблонов. Они конкретизируют индивидуальный техпроцесс сборки ЭМ, выбранное оборудование АТО, оснастку СТО, индивидуальную подструктуру, структуру.

3. Структурирование данных в виде КТ БЗ позволяет решить комплекс задач по редактированию информации об изделии, технологической среде, обеспечить модульность построения системы автоматизированного проектирования, применить принцип неокончательного решения на промежуточных этапах проектирования. Отметим также относительную простоту формализованного представления информации в КТ БЗ и возможность применения теории множеств. Такая форма представления данных также позволяет использовать в качестве программного обеспечения современные высокопроизводительные и многофункциональные системы управления базами данных (СУБД).

Процесс проектирования АТП и структур ГАСК на основе предложенного метода синтеза можно представить в виде совокупности последовательно выполняемых задач:

- определение предметной области применения метода ("Сборка ЭМ из однотипных или разнотипных ЭК");
- определение и классификация множеств объектов данной предметной области и формализация их представления в виде математических моделей (расчленение типового АТП сборки ЭМ на переходы, операции, групповые подструктуры ГАСК с учетом применяемого технологического, транспортного оборудования и оснастки);
- построение соответствующих математических моделей;
- расчленение каждого объекта на составные части — признаки с установлением структурных связей между ними (структурирование данных и представление их с использованием КТ БЗ множеством шаблонов и моделей);
- выбор СУБД, машинная (программная) реализация комплекса КТ БЗ на ее базе;
- синтез множества вариантов моделей индивидуальных АТП и структур ГАСК на каждом этапе по правилам КТ БЗ с выполнением параметрической и структурной оптимизации;
- оптимальный выбор варианта АТП и структуры ГАСК по применяемому критерию (на каждом этапе оптимизации применяется соответствующая интерпретация комплексного технико-экономического показателя эффективности АТП и структур ГАСК);
- выдача технологической документации в виде маршрутных, операционных карт и управляющих программ УТП для станков с числовым программным управлением ГАСК.

Предложенный метод синтеза применен в САПР "Контур" для проектирования оптимальных технологических переходов, операций, а также транспортных операций, подструктур, структур ГАСК [Ю.В. Иванов, А.Е. Курносенко. Свидетельство официальной регистрации

программы для ЭВМ № 2006620158 (База данных для САПР структур гибких автоматизированных комплексов сборки электронных модулей 1-го уровня) и 2006611922 (САПР структур гибких автоматизированных комплексов сборки электронных модулей 1-го уровня). Зарегистрировано 2 июня 2006 г.].

Его реализация предполагает использование не только присущих ему особенностей, но и некоторых решений, характерных для группы методов традиционного направления. Например, применение в качестве основы проектирования типовых и групповых АТП сборки ЭМ (в синтезе подструктур) и унифицированных структур ГАСК (в синтезе структур). Это заложено в специфике предметной области ("Сборка ЭМ"), особенностях применяемой методики проектирования и в связи с широким распространением типовых и групповых АТП в реальном производстве.

Выводы

1. Разработанный метод синтеза по сравнению с известными методами является перспективным при проектировании АТП многономенклатурной сборки электронных модулей в роботизированных сборочных комплексах ГАСК благодаря возможности получения множества новых решений (индивидуальных АТП), сравнения и последующей оптимизации (структурной и параметрической).

2. Метод основан на условном дроблении объектов и участников проектирования на мелкие типовые элементы — признаки с установлением структурных связей в конструкторско-технологической базе знаний.

3. Признаки содержат имя, связь в иерархии, качественную и количественную характеристику.

4. Каждый объект в базе знаний (с использованием теории множеств) представлен множеством признаков, связанных системой отношений (структурных иерархических связей).

5. Множества признаков объектов разделены на шаблоны и модели. Они представляют собой формализованное описание множества признаков элемента объекта проектирования, определяющее набор его характеристик, положение, связи в общей иерархии объектов.

6. Шаблон описывает типовой элемент, а модель — индивидуальный. Шаблоны создаются до начала проектирования. Модели разрабатываются в процессе проектирования структур и их элементов, используя информацию КТ БЗ и правила проектирования.

7. Процесс синтеза вариантов происходит с использованием информации КТ БЗ и заключается в отображении структурных связей между изделием и базой знаний по определенным правилам данной предметной области. При этом формируется некоторое конечное множество вариантов (структур ГАСК, технологических маршрутов или их элементов), из которых можно выбрать один, удовлетворяющий критерию эффективности *P*.

8. Предложенный метод синтеза реализован в САПР (программном комплексе "Контур"). Применение компьютера значительно (на порядки) уменьшило трудоемкость проектирования вариантов АТП и структур ГАСК.

Библиографический список

1. **Иванов Ю.В., Лакота Н.А.** Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов: учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.

2. **Буловский П.И., Ларин В.П., Павлова А.В.** Проектирование и оптимизация технологических процессов и систем сборки радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1989. 176 с.

3. **Иванов Ю.В.** Автоматизация проектирования структур гибких автоматизированных сборочных комплексов многономенклатурного производства электронной аппаратуры: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 45 с.

4. **Иванов Ю.В.** Проектирование автоматизированных технологических процессов сборки ЭМ в ГАСК: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 45 с.

5. **Spur Gunter, Krause Frank-Lothar.** CAD — Technik. Lehr — und Arbeitsbuch fur die Rechnerunterstutzung in Ronstruktion und Arbeitsplanung. Munchen: Carl Hanser Verlag, 1984. 689 p.

УДК 621.71

Е.И. Самаркина, А.И. Самаркин, С.И. Дмитриев, *канд-ты техн. наук,* **Е.А. Евгеньева**
(Псковский государственный университет)
E-mail: dmitrievsi55@gmail.com

Моделирование сборок в CAD

Рассматриваются особенности автоматизированного проектирования технологических процессов сборки изделий в машиностроении, в том числе с применением системы SolidEdge.

The features of computer-aided design of technological processes of assembling products in mechanical engineering, including the use of SolidEdge.

Ключевые слова: сборка, схема сборки, модель сборки, автоматизированное проектирование, компьютерное моделирование, дерево сборки.

Keywords: assembly, assembly diagram, model assembly, computer-aided design, computer simulation, wood of assembly.

В 1996 г. компания Intergraph выпустила на рынок систему SolidEdge — инструмент, предназначенный для проведения комплекса работ по твердотельному моделированию в среде Windows на компьютерах класса ПК.

SolidEdge стала одной из первых успешных реализаций подходов, позволяющих работать со сборкой в традиционной, привычной для современного конструктора манере.

Система SolidEdge изначально создавалась для параметрического твердотельного моделирования сборочных узлов — позиционирование частей изделия или создание новых с привязкой к уже существующим в модельном пространстве сборки элементам конструкции. Новые детали можно создавать, используя элементы соседних. Впоследствии это представление о параметрическом твердотельном моделировании распространилось практически на все современные CAD, предназначенные для моделирования сборок. Существуют два основных подхода конструкторского твердотельного моделирования "снизу вверх" и "сверху вниз" для решения задач разработки технологии сборки.

Коротко подход конструкторского моделирования "снизу вверх", реализованный в CAD, сводится к следующим этапам:

- на первом этапе моделируются детали;
- на последующих создаются модели узлов из ранее созданных моделей деталей;
- на последнем этапе, когда все узлы смоделированы, они добавляются в сборку изделия.

Используя те же возможности CAD, технолог-сборщик может из готовых конструкторских моделей деталей "собирать" сборочные единицы, тем самым определяя последовательность их сборки и состава. Последовательность сборки будет определяться порядком включения моделей деталей (узлов), а состав — моделями деталей (узлов) в составе сборочной модели.

В технологической модели сборки, как и в конструкторской модели, история создания графически представлена объектом — ациклическим, направленным графом, содержащим историю построения модели (дерево построения) сборочной модели. Дерево представляет собой одноуровневую, упорядоченную структуру, отображающую порядок включения моделей деталей (узлов) в сборочную модель.

Применительно к задачам моделирования сборок можно соотнести временную шкалу и дерево сборки (рис. 1). Начальной точке отсчета времени на временной шкале будет соотнесена первая часть изделия, попадающая в сборку, т.е. та, которая выше всех в дереве

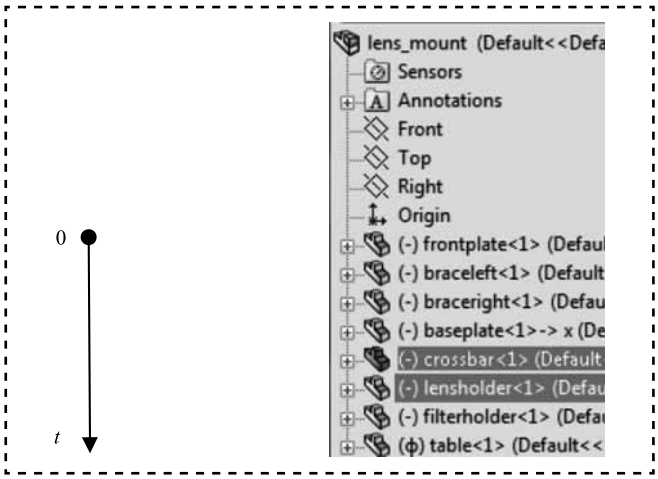


Рис. 1. Дерево сборки

сборки. Тогда все части, находящиеся ниже в дереве, попадают в сборку позже по времени, чем первая. Одна часть изделия, находящаяся выше другой части в дереве сборки, будет присоединяться раньше, чем другая.

Таким образом, можно говорить не только об истории создания сборочной модели, но и о процессе сборки, развивающемся во времени, и о моделировании самого процесса сборки и при этом использовать те же инструменты создания сборочных моделей, что и при конструировании.

Дерево конструкторской модели сборки традиционно используется и как средство навигации и редактирования. Дерево технологической модели расширяет указанные применения и позволяет, редактируя, влиять на технологическую последовательность сборки. Можно считать, что по содержательности такое дерево приближается к технологической схеме сборки. Для этой цели в составе SolidEdge предусмотрен навигатор PathFinder, который отображает древовидную структуру сборки и помогает ориентироваться в сложных узлах, выбирать и использовать для работы необходимые детали, а также управлять процессом визуализации сборки на экране (см. рис. 1).

В отличие от конструктора, технолог, определяя порядок вхождения в сборку моделей частей изделия, задает не только привязки (параметрические и размерные связи), но и при этом учитывает технологические возможности сборки (доступ к месту установки, сохранение целостности при перемещении, устойчивость в процессе сборки и т. д.).

Таким образом, с помощью CAD можно "вручную", без привлечения дополнительных алгоритмов принятия решений о перестановках и группировании структуры модели изделия, решать следующие задачи проектирования технологического процесса сборки:

- определять состав сборочных единиц (выполнять технологическое членение);
- определять последовательность установки деталей и сборочных единиц в процессе сборки;
- формировать данные для ведомости сборки изделия (сборочных единиц различного уровня).

При этом технолог-сборщик заново выполняет действия конструктора и должен отлично владеть методами работы с CAD. Чем больше конструктор наработает моделей изделий, тем реже он будет прибегать к конструированию "снизу вверх". Это связано с тем, что для реального производства редко создаются совершенно уникальные конструкции, изменения чаще всего носят локальный характер. Поэтому целесообразнее использование подхода "сверху вниз" для случаев, когда имеются один или несколько аналогов.

Суть подхода конструкторского моделирования "сверху вниз", реализованного в CAD, сводится к следующим этапам:

- выполняется заимствование моделей сборочных единиц и редактирование геометрических и размерных взаимосвязей;
- создаются модели сборочных единиц и деталей с привязкой их к уже существующим частям конструкции (в контексте сборки);
- когда все узлы смоделированы, они добавляются в общую сборку изделия (если заимствовалось не целое изделие).

Казалось бы, технолог-сборщик мог бы использовать подход "сверху вниз", взять в качестве моделей-аналогов конструкторские модели узлов и разбивать их на технологические по своему усмотрению. Однако в современных CAD нет инструмента, позволяющего оперативно разрывать большое количество ранее наложенных сборочных ограничений, без появления впоследствии ошибок и нестыковок. Решение этой задачи становится тем сложнее,

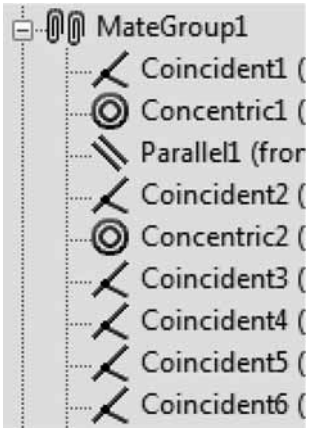


Рис. 2. Сопряжения в дереве сборки

чем больше деталей в исходной сборочной единице и, соответственно, больше разнообразных геометрических и размерных ограничений, связывающих детали сборки на месте разрыва (рис. 2).

Суррогатным решением может быть в этом случае возможность погасить (сделать невидимым) часть изделия, которая не будет попадать в сборочную единицу, с которой работает технолог, или использование вкладки с исполнениями, где будет содержаться состояние собираемого изделия, начиная от сборочной единицы, состоящей только из деталей, и заканчивая изделием. Таким способом можно зафиксировать технологический состав на этапе сборки, но при этом дерево не будет отражать последовательность сборки.

Нестыковки и сложности в части использования трехмерных моделей для выполнения задач, связанных с разработкой технологических процессов сборки, требуют нового программного обеспечения. В результате должен появится новый инструмент или модуль в составе CAD, адресованный именно технологу-сборщику.

Еще одной возможностью визуального представления технологических задач сборки является "разнесенная сборка" (рис. 3). С помощью плакатов с "разнесенными сбор-

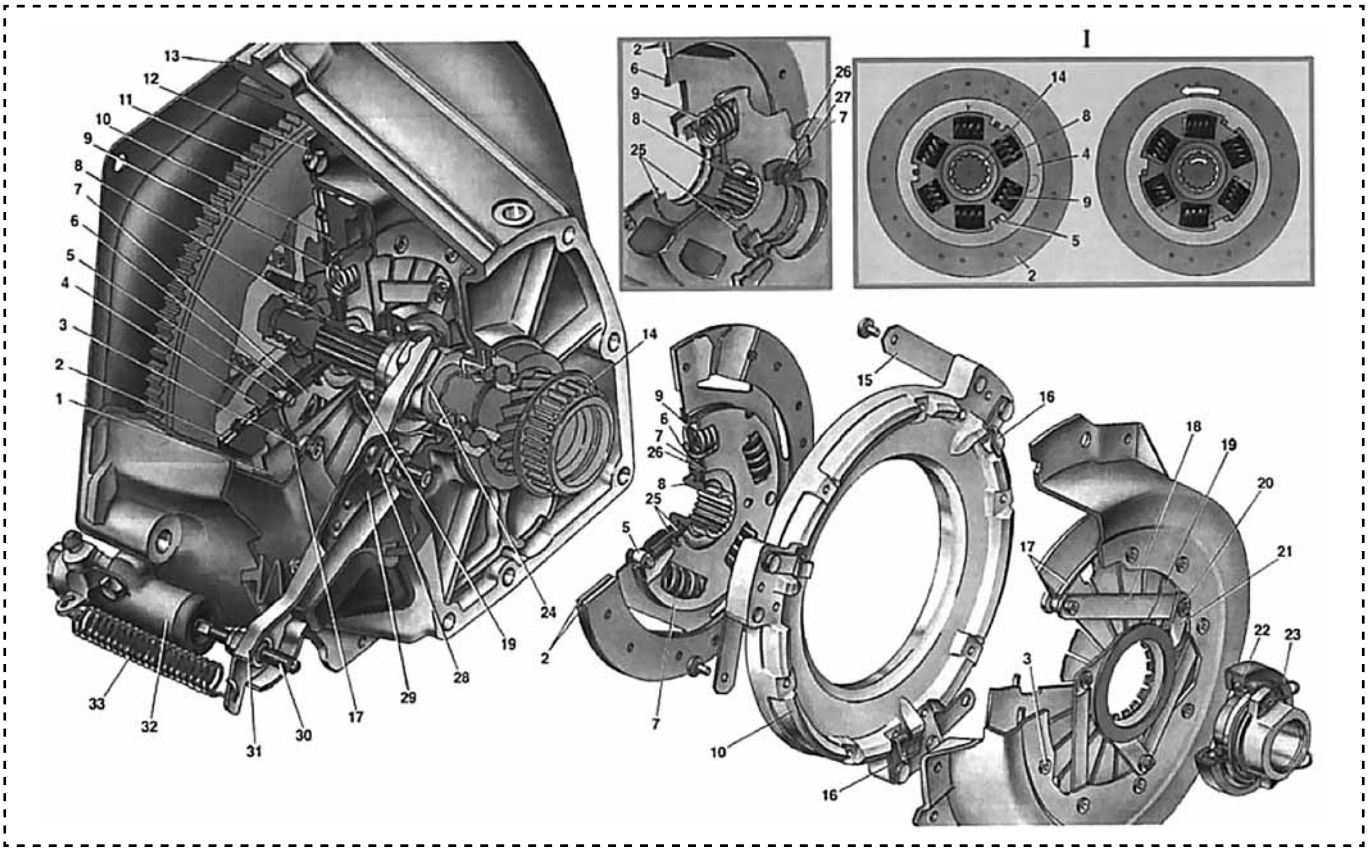


Рис. 3. Плакат с разнесенной сборкой узла автомобиля "Нива"

ками" можно было отобразить промежуточные результаты сборки в последовательности ее осуществления. Функция создания видов с "разнесенными" компонентами сборки (англ. термин "взорванный вид" — Exploded View) в настоящее время реализована во многих CAD (Solid Works, Solid Edge и др.) как штатно, так и в виде подключаемых программных модулей (SolidWorks Composer или CATIA Composer). Использование данных инструментов является наиболее доступным и легким в освоении на сегодняшний день средством технологического моделирования процесса сборки.

В настоящее время разработаны методические рекомендации по использованию разнесенных видов для технологического моделирования процесса сборки:

- на первом этапе выполняется заимствование моделей сборочных единиц конструкторской модели изделия;
- на следующем — скрываются модели сборочных единиц и деталей всех, кроме присоединяемых первыми (одним или несколькими сборочными переходами) (рис. 4);
- с помощью SW Exploded View создается "разнесенная сборка" видимых элементов сборки (результаты сборки фиксируются в графическом файле, отображающем состояния до и после присоединения или в виде видео);
- далее видимыми становятся следующие присоединяемые к уже "собранным" частям элементы;
- их разнесение осуществляется тоже с помощью редактирования "разнесенной сборки" Exploded View, а результаты фиксируются;
- на последнем этапе, когда все сборочные единицы и детали видимы, технолог имеет последовательность технологических состояний, описывающих технологию сборки.

Таким образом, технолог может разбивать конструкторскую модель на технологические сборочные модели и фиксировать последовательность сборки по своему усмотрению (рис. 5).

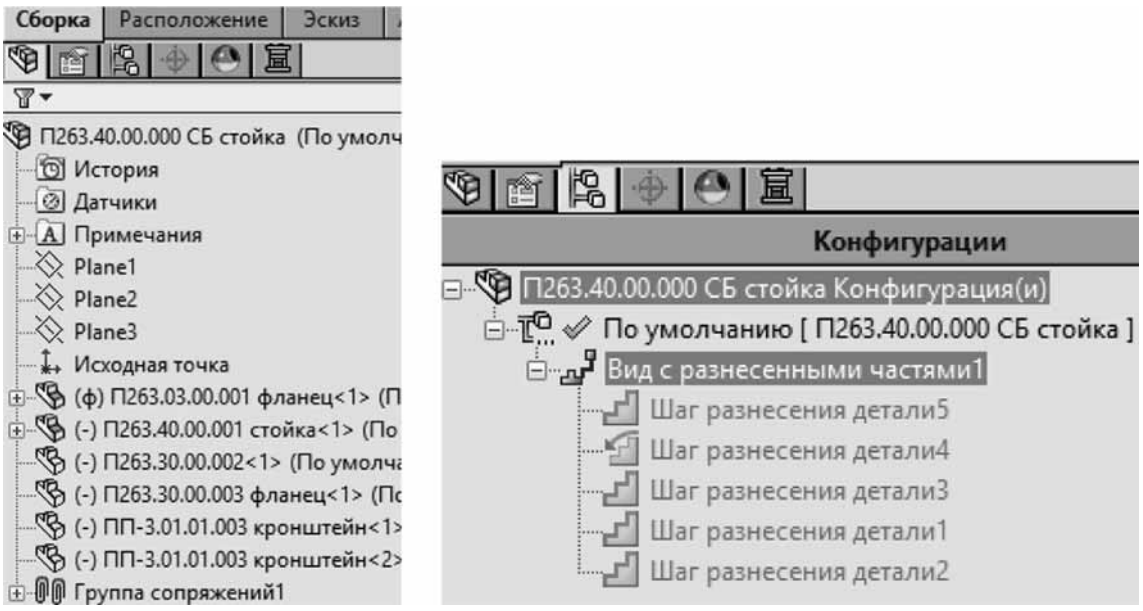


Рис. 4. Дерево с "погашенными" деталями и шаги разнесения деталей

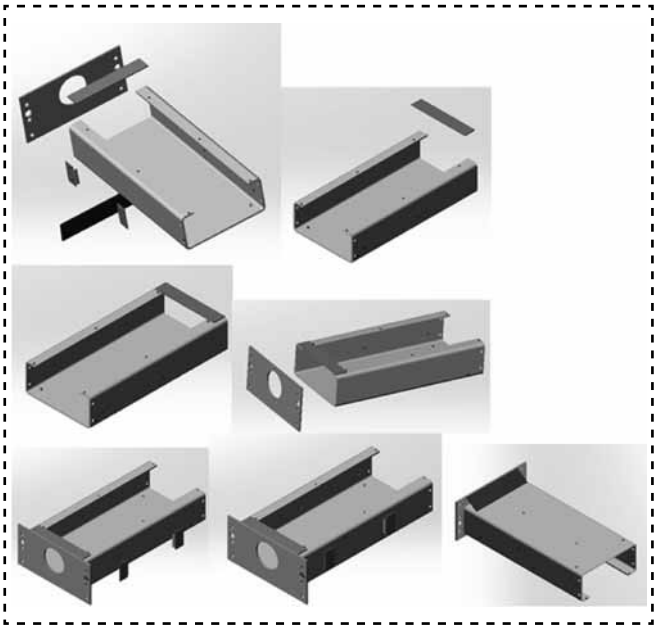


Рис. 5. Разнесенная сборка стойки и графические файлы, отражающие последовательность сборки

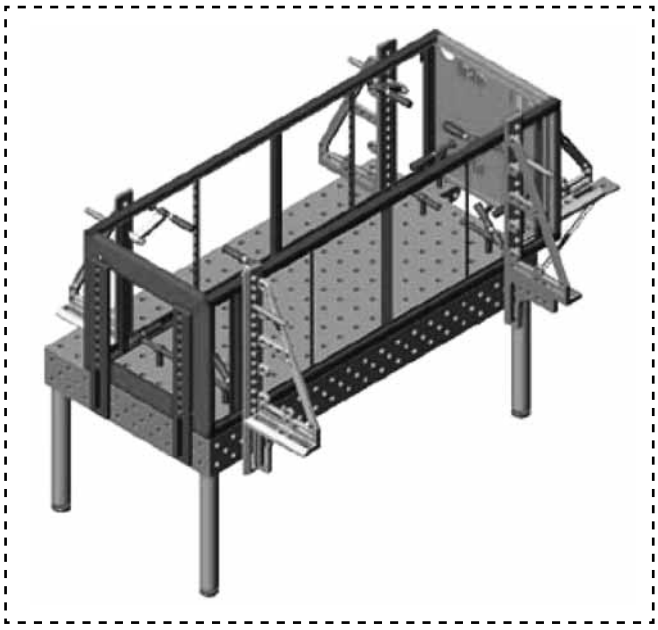


Рис. 6. Графический файл технологической модели сборки с элементами приспособления

Для широкого использования данной методики на производстве только возможностей Exploded View недостаточно. Процесс сборки — это не только присоединение частей изделия, отраженных в конструкторской спецификации, но также сборка и разборка элементов сборочных приспособлений и временных, но необходимых для выполнения операций, элементов (защитных кожухов, крышек и т.п.).

В связи с этим предлагается разработка специальной библиотеки трехмерных моделей сборочных приспособлений для сборки-сварки на универсальном сборочном столе, которые включаются в технологическую модель наряду с конструкторскими элементами. Таким образом, можно получить графические файлы (рис. 6), содержащие полноценную замену сборочных операционных эскизов.

Предлагаемая методика не заменяет, а дополняет традиционную схему сборки. В то же время эта методика требует продуманной организации хранения графических файлов технологической модели, которая может быть реализована современными системами документооборота (PDM), так как реализуется штатными средствами CAD. Целесообразно также хранение данных файлов как вложенных (ссылочных) документов сборочных операций, спроектированных с помощью САПР ТП, дополняя тем самым традиционные операционные эскизы.

УДК 620.17

А.Я. Минаев, *канд. техн. наук,* **Ю.В. Коровкин**
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)
E-mail: minaev_mashsport@list.ru

Экспериментальные исследования демпфирующих свойств магнитореологических эластомеров

Исследованы демпфирующие свойства магнитореологических эластомеров. Показано, что при воздействии на образец магнитным полем появляется возможность сдвигать расположение резонансных частот в несколько раз. Дается обоснование условий, при которых создается активно управляемая вибрация в испытуемом образце при воздействии на него электрическим полем.

A damping properties of magnetic — rheological elastomers are investigated. It is shown, that there exusts possibility to more the disposition of resonance frequencies as much as several times, if to act on a sample with magnetic influence. It is determine conditions which are relevant for creation of controllable vibration at testing sample, at which is undergoing to influence of electrical field.

Ключевые слова: демпфирующие свойства магнитореологических эластомеров, расположение резонансных частот, создание и активное управление вибрацией.

Keywords: damping properties of magneto-rheological elastomers, disposition of resonance frequencies, active control of vibration.

Одним из важнейших свойств конструкционных материалов, эксплуатируемых при существенных динамических нагрузках, является их демпфирующая способность, т.е. возможность поглощать энергию колебаний за счет сил внутреннего трения в материале. Демпфирующая способность многих изделий современной техники является весьма важной особенностью материала, поскольку ему приходится преодолевать резонансные частоты с повышенными и опасными в процессе эксплуатации вибрациями.

Создание конструкций с высоко демпфирующими свойствами позволяет обеспечивать более высокую безопасность, ресурс работающего изделия и, соответственно, более комфортные и надежные условия эксплуатации всего объекта.

Методики определения демпфирующих характеристик (при учете сил трения внутри материала) по сравнению с другими механическими характеристиками создаваемых материалов представляют достаточно сложный процесс, так как определение степени поглощения энергии в материалах при циклических нагрузках приводит к необходимости использования весьма тонкого физического эксперимента.

В работах [1, 2] исследовали демпфирующие свойства магнитореологических эластомеров в зависимости от степени воздействия на них магнитных полей, а также величин ускорений. Динамические и, в частности, демпфирующие свойства данных материалов малоизучены. Теоретическое моделирование свойств магнитных эластомеров проводилось в работе [3]. Широкие возможности для исследования динамических характеристик испытуемых образцов предоставляет испытательный комплекс ИМАШ РАН, в состав которого входит система вибрационного и измерительного оборудования для записи и исследования характеристик возбуждаемых колебаний.

В связи с перспективными разработками новых так называемых смарт, или интеллектуальных материалов, — магнитоактивных эластомеров возникают новые широкие возможности их использования в различных областях современной техники.

Магнитоактивные эластомеры позволяют изменять динамические характеристики данного материала с помощью интенсивности воздействия магнитных полей на этот материал. Динамические характеристики данного класса материалов исследовали с помощью опытных образцов, предоставленных ФГУП ГНИИХТЭОС. При изготовлении исследуемого образца в матрицу эластомера были встроены измельченные частицы пермаллоя: материала, обладающего высокой магнитной проницаемостью (рис. 1). Данный образец испытывали на вибростенде на воздействие различных амплитуд ускорений и магнитных сил. Выявляли изменение динамических свойств, т.е. смещение резонансных характеристик в область более высоких частот при усилении воздействий магнитных полей, а также проявление некоторой нелинейности изменения ускорений (резонансных пиков) на выходе, в верхней части образца при увеличении ускорений на опоре образца (в заданном рассмотренном диапазоне).

Вибрационные свойства создаваемых материалов исследовали с помощью модернизированного испытательного оборудования с программным обеспечением для аналитической обработки, хранения и отображения результатов испытаний на компьютере. Использовали программный модуль приборов LabVIEW, позволяющий создавать с помощью виртуальных приборов и записывать в компьютер воздействие на испытуемый образец различных по своим динамическим характеристикам форм колебаний (синусоидальных, треугольных, прямоугольных и др.).

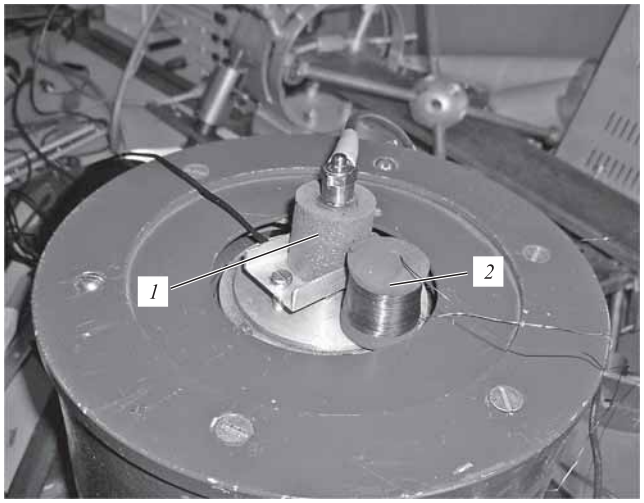


Рис. 1. Испытуемые образцы с оснасткой на столе вибратора:
1 — образец с премаллоем; *2* — образец магнитоактивного эластомера

Исследуемый материал закрепляли на столе вибровозбудителя. Рядом с опорной частью образца закрепляли один из вибродатчиков — пьезоакселерометр, используемый в качестве опорного сигнала, регистрирующего ускорения колебаний на входе образца — $A_{вх}$. На верхней части образца устанавливали вибродатчик, регистрирующий ускорения колебаний на выходе образца — $A_{вых}$.

В проведенной серии испытаний образец подвергался последовательному воздействию синусоидальным сигналом с различной величиной возбуждения на входе — $U_{виб}$, что соответствовало: 0,3; 0,5; 0,7 и 0,9 мВ на выходе звуковой карты компьютера. Это позволяло создавать ускорения на опорной части образца соответственно: 2,46; 4,1; 5,74; 7,38 м/с^2. На выходе образца (в верхней точке) датчик регистрировал соответствующие сигналы — $U_{обр}$. Для указанных различных величин ускорений на входе образца определяли сигналы ускорений на выходе и строили амплитудно-частотные характеристики в диапазоне частот до 150 Гц. При этом в испытаниях задавали воздействие магнитных сил в трех случаях:

максимальное воздействие магнитных сил на образец (без проставки): сила притяжения образца к магниту 14,5 Н (рис. 2);

некоторое ослабление воздействия магнитных сил (при установке проставки 4,5 мм), т.е. при промежуточном воздействии магнитных сил (рис. 3);

слабое воздействие магнитных сил (проставка 15 мм): магнитные силы практически отсутствовали (рис. 4).

Рассмотренное максимальное воздействие магнитных сил на образец дает расположение резонансных частот в диапазоне 95...110 Гц и усиление сигналов $A_{вых}/A_{вх}$ до 5 раз. В случае уменьшения действия магнитных сил ампли-

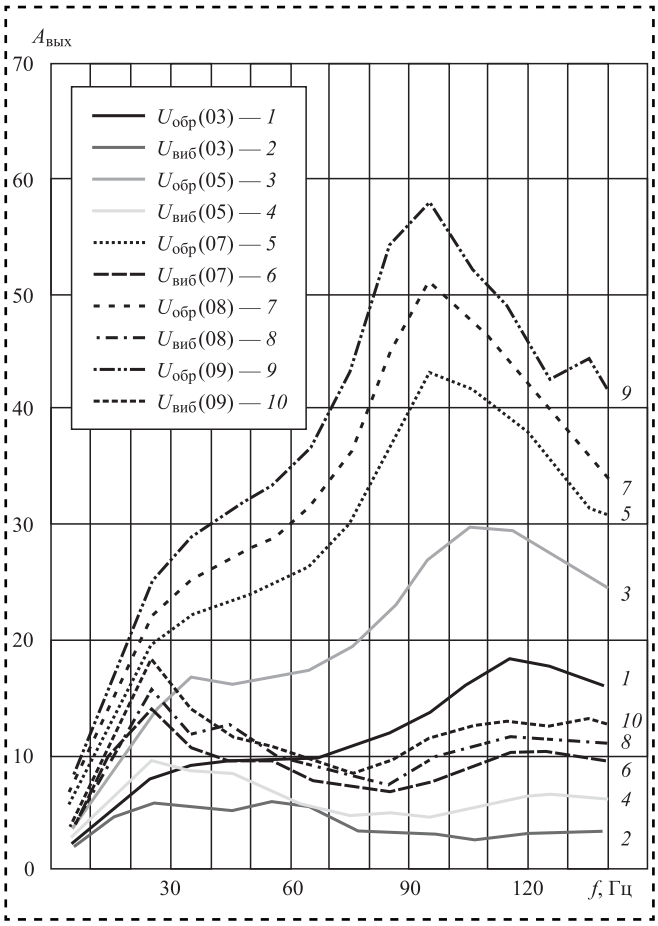


Рис. 2. АЧХ образца при максимальном воздействии магнитных сил

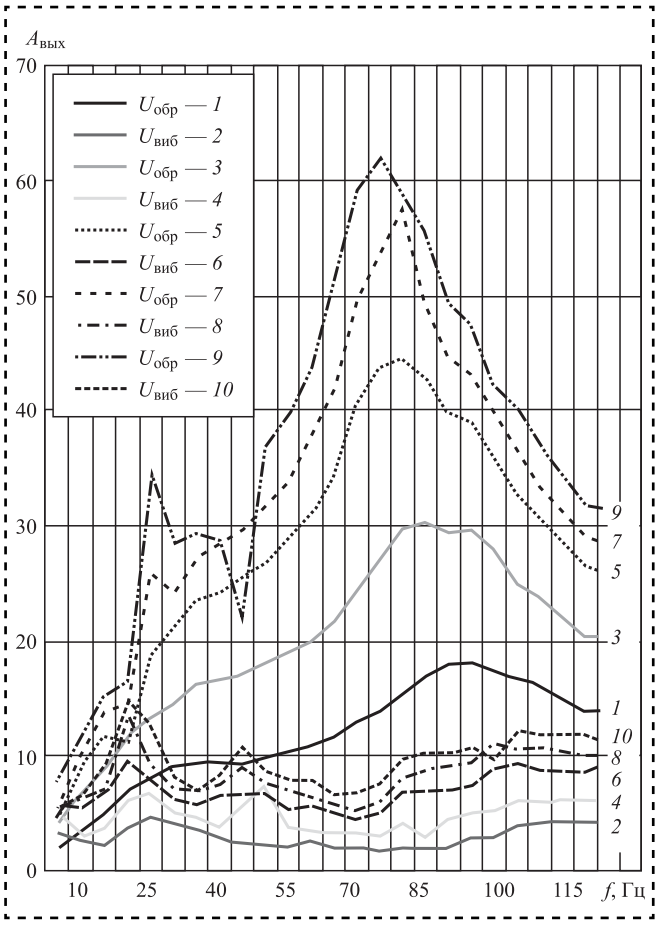


Рис. 3. АЧХ образца при промежуточном воздействии магнитных сил

тудно-частотные характеристики (см. рис. 3) выявляют снижение резонансных частот до 80...90 Гц и усиление сигналов $A_{вых}/A_{вх}$ в 5 раз. При дальнейшем ослаблении действия магнитных сил на испытуемый образец наблюдается последующее снижение резонансных частот до 45 Гц и усиление сигналов на выходе образца более 6 раз (см. рис. 4).

На рис. 5 приведен результат изменения резонансных пиков ускорений (максимальных значений) для трех рассмотренных случаев действия магнитных сил: рис. 2 кривая — А; рис. 3 кривая — Б; рис. 4 кривая — С. Кривые А, Б и С построены для увеличивающихся величин возбуждений от 0,3 до 0,9 мВ на выходе звуковой карты компьютера. Зависимости имеют слабовыраженный нелинейный характер.

Большой интерес вызывает возможность управления динамическими свойствами материала путем мгновенного воздействия на его внутреннюю структуру. Например, с помощью воздействия на токо- и магнитопроводящие наночастицы, встроенные в матрицу материала, при подаче внешних электрических сигналов с их структурными изменениями. При этом после окончания внешних воздействий этот материал сохраняет заложенные в него динамические характеристики. К данному классу, так называемых интеллектуальных материалов, можно отнести электро- и магнитоактивные полиуретаны — новый класс разрабатываемых эластомеров. Например, упругостью и деформацией, создаваемых резиноподобных эластомеров, можно управлять с помощью постоянных и переменных магнитных, а также электрических полей.

В качестве примера рассматривали возможность управляющего воздействия на цилиндрический образец магнитоактивного эластомера диаметром d = 18,8 мм и высотой h = 18,8 мм, с намотанными на него проводниками (см. рис. 1).

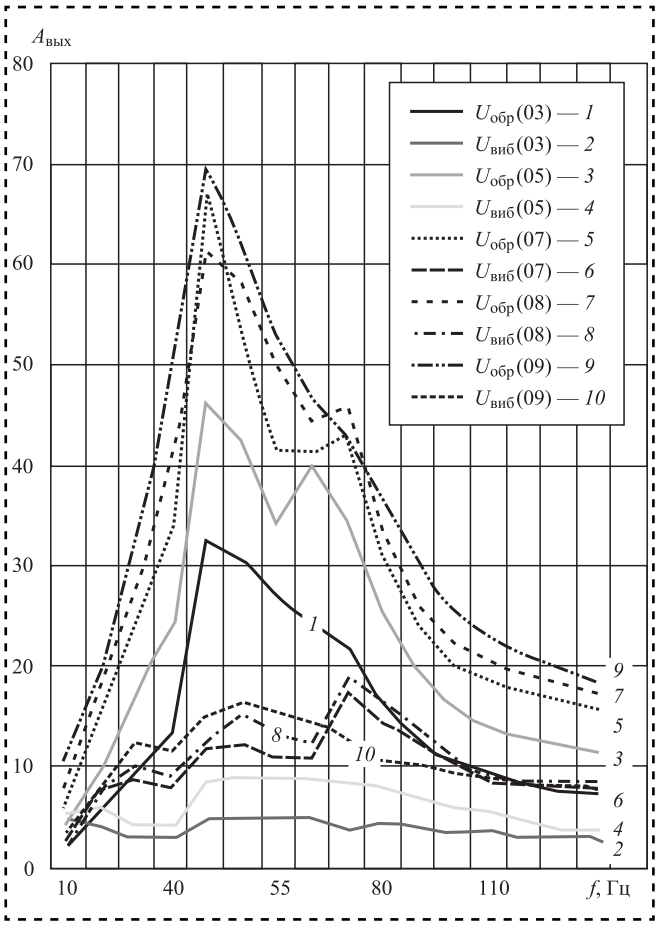


Рис. 4. АЧХ образца при слабом воздействии магнитных сил

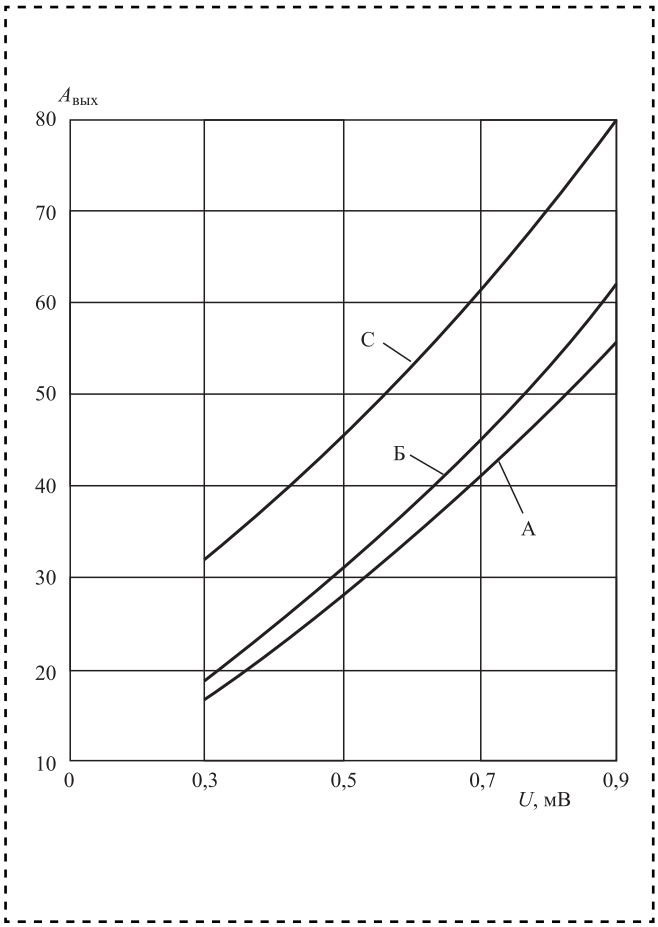


Рис. 5. Изменение резонансных пиков ускорений для трех случаев воздействия магнитных сил

Необходимо определить, какой величины токи I_1 и I_2 требуется пропустить по проводникам в теле эластомера, чтобы возникшие вокруг них круговые магнитные индукции B_1 и B_2 создавали магнитные силы F_1 и F_2 взаимодействия, производящие деформацию эластомера, для примера в $\Delta h = 0{,}8$ мм.

Чтобы определить силу, создающую деформацию образца диаметром $d = 18{,}8$ мм и высотой $h = 18{,}8$ мм, образец сжали гирей массой 500 г, что соответствует силе $F \approx 5$ Н. Рассчитали, какие токи I_1 и I_2 необходимо пропустить по проводникам, чтобы возникшие вокруг них круговые магнитные поля взаимодействовали с силой $F = 5$ Н, которая должна создать деформацию в теле эластомера величиной $\Delta h = 0{,}8$ мм.

Магнитная индукция B, создаваемая первым проводником в точках, в которых расположен второй провод, по закону полного тока [Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники // М.: Высшая школа. 1973. 740 с.] равна

$$B = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi a}.$$

Подставим в формулу для силы $F = I_2 B dl$ значение B и получим силу взаимодействия магнитных полей в проводниках:

$$F = \frac{I_1 I_2 \mu\mu_0 dl}{2\pi a},$$

где I_1 и I_2 — силы тока в проводниках; μ — относительная магнитная проницаемость ферромагнетика (наночастиц феррита, встроенных в матрицу эластомера), $\mu = 2000$; μ_0 — магнитная постоянная (вакуума), $\mu_0 = 2\pi 10^{-7}$ Гн/м; dl — длина проводников, м; a — расстояние между проводниками, м.

Преобразуем формулу силы для вычисления токов. Пусть токи будут равны по величи-

не $I_1 = I_2$. Тогда получим формулу для определения силы токов:

$$I = \sqrt{\frac{F2\pi a}{\mu\mu_0 dl}}.$$

После подстановки значений получим, что $I \approx 9$ А, что является довольно существенной величиной. Для того чтобы уменьшить токи, можно изменить одну из величин, в частности, можно выбрать ферромагнетик (например, порошкообразный пермаллой у которого $\mu = 200\ 000$, тогда токи можно снизить приблизительно в 447 раз, т.е. $I \approx 0{,}02$ А).

Заключение

Для измерения параметров динамических характеристик управляемых эластомеров использовался лабораторный виброиспытательный комплекс, включающий в себя разработки виртуальных приборов для компьютера LabVIEW. Воздействие на образец магнитными полями различной силы позволяло плавно повышать зону расположения резонансных частот от 45 до 110 Гц.

Исследования, проводимые в ИМАШ РАН, намечают пути создания принципиально нового класса управляемых магнито- и электроактивных эластомеров. Данный класс материалов характеризуется возможностью управления колебательными или вибрационными процессами, происходящими в исследуемом образце при воздействии на него магнитными и электрическими полями.

Библиографический список

1. **Минаев А.Я., Коровкин Ю.В., Израилович М.Я.** Экспериментальные исследования динамических свойств и внутреннего трения магнитореологических эластомеров // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 9. С. 15—18.

2. **Коровкин Ю.В., Минаев А.Я., Степанов Г.В.** Исследование динамических свойств магнитоактивных эластомерных композитных материалов на лабораторном испытательном комплексе // Вестник машиностроения. 2014. № 2. С. 67—69.

3. **Chertovich AV., Stepanov GV., Kramarenko E.Y., Khokhlov A.R.** New Composite Elastomers with Giant Magnetic Response // Macromolecular Materials and Engineering. 2010. V. 295. N 4. P. 336—341.

УДК 539.4+539.2

В.В. Дунаев, *канд. техн. наук*
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
В.Н. Пучков, *канд. техн. наук (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)*
E-mail: puchkov.v.n@bk.ru

Прочность и износ элементов болтовых соединений в условиях фреттинга

Представлено обобщение результатов по влиянию некоторых факторов на прочность и износ элементов болтовых соединений в условиях фреттинга. Получена расчетно-аналитическая зависимость амплитуды циклических напряжений от основных факторов, действующих в условиях фреттинга.

A generalization of previous results on the significant influence of certain factors on the strength and wear of bolting under fretting. The calculated analytical dependence of the amplitude of cyclic stresses on the main factors in the conditions of fretting.

Ключевые слова: болтовые соединения, фреттинг-износ, контактное давление, физико-механические свойства материалов, модуль упругости.

Keywords: bolted joint, fretting-wear, contact pressure, physical-mechanical properties of material, modulus of elasticity.

Болтовые соединения планера самолета находятся под воздействием случайной вибрации, периодических деформаций элементов конструкции и циклических нагрузок. Поэтому вероятность появления фреттинга в болтовых соединениях с зазором и радиальным

натягом весьма высока. Фреттинг-износ является основным фактором, определяющим фреттинг-коррозию и фреттинг-усталость элементов соединения [1]. В результате фреттинг-износа происходит изменение размеров контактирующих деталей.

Минимизация износа и предотвращение разрушения элементов конструкции в условиях фреттинга является важной проблемой для обеспечения требуемого ресурса элементов планера самолета.

Анализ механизма передачи внешней нагрузки в болтовых соединениях позволяет выделить основные зоны возникновения фреттинга (рис. 1).

Плоские контактные поверхности при затяжке болтов (рис. 1, *а*):

— контакт головки болта и шайбы с соединяемыми элементами (точки *1* и *2*);

— внешняя граница контакта соединяемых элементов (точка *3*);

— внутренняя граница контакта соединяемых элементов (конус давления) (точка *4*).

Цилиндрические контактные поверхности стержня болта и отверстия в соединениях с зазором (рис. 1, *б*, точка *5*) и с натягом (рис. 1, *в*, точка *6*). При этом болт не затянут.

В соединениях с натягом места повреждения от фреттинга и зарождения усталостной трещины сдвигаются к ненагруженной стороне отверстия, в то время как с увеличением зазора зона фреттинга и место зарождения усталостной трещины сдвигаются в противоположном направлении к нагруженной стороне отверстия [2]. Результаты испытания болтовых соединений из алюминиевых сплавов Д16АТ, Д16УТ, АК6 и титанового сплава ОТ4-1 при циклических нагрузках подтверждают наличие указанных очагов фреттинга [3—6].

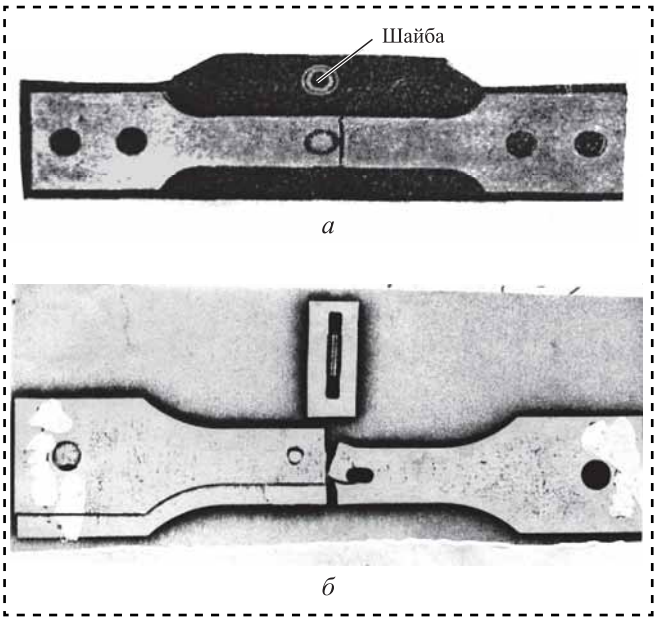


Рис. 2. Типичные усталостные разрушения соединений при затяжке болта (*а*) и отсутствии затяжки (*б*)

На рис. 2 показаны типичные усталостные разрушения соединений из алюминиевого сплава Д16Т при затяжке болта и при отсутствии затяжки. Разрушение затянутого соединения происходит в зоне наружного диаметра шайбы по границе неповрежденной области (рис. 2, *а*). В незатянутом соединении (рис. 2, *б*) повреждающее влияние фреттинга состоит в образовании усталостной трещины на контуре отверстия.

Факторы, существенно влияющие на процесс фреттинг-износа [2]:

— величина и характер распределения контактного давления;

— амплитуда относительного перемещения контактирующих пар;

— частота относительного циклического перемещения двух подверженных фреттингу элементов;

— свойства контактирующих материалов, твердость их поверхностей и шероховатость обработки.

Влияние контактного давления на долговечность соединения в условиях фреттинга показано на рис. 3: пластины из Д16АТ (кривая *1*) и из титанового сплава ВТ6 (кривая *2*) [4, 7]. Амплиту-

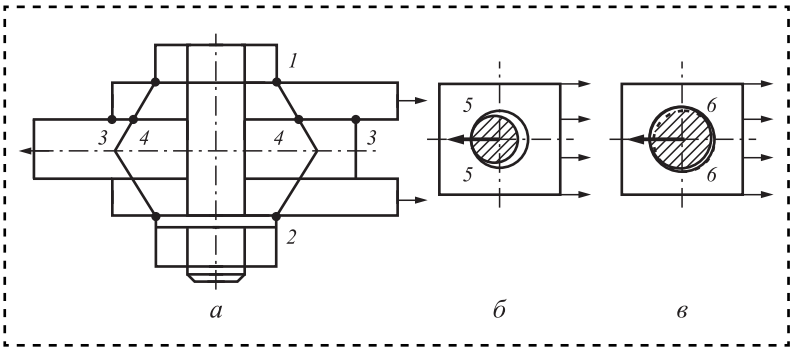


Рис. 1. Болтовое соединение и возможные зоны возникновения фреттинга:
а — плоские поверхности; *б* — цилиндрические соединения с зазором; *в* — цилиндрические соединения с натягом

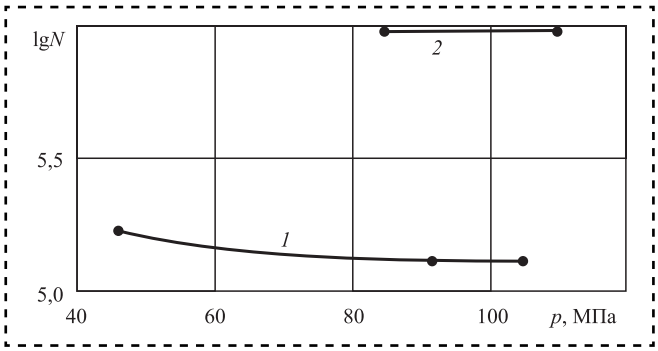


Рис. 3. Влияние контактного давления на фреттинг-усталость пластины из Д16НТ (*1*) и ВТ16 (*2*)

да циклических напряжений σ_a = 78 МПа при R = 0,1 и f = 14 Гц. При изменении контактного давления от 70 до 110 МПа фреттинг-усталость пластин остается практически постоянной. При этом долговечность пластин из ВТ6 в 7,6 раза выше долговечности пластин из Д16АТ. Этому способствует более высокая износостойкость сплава ВТ6 при фреттинге, обусловленная прочностью материала.

На рис. 4 показана схема испытания пластин толщиной 5 мм. Необходимое контактное давление между стандартной шайбой *3* из Д16Т и 30ХГСА и пластиной *1* создавали затяжкой болтов *2*.

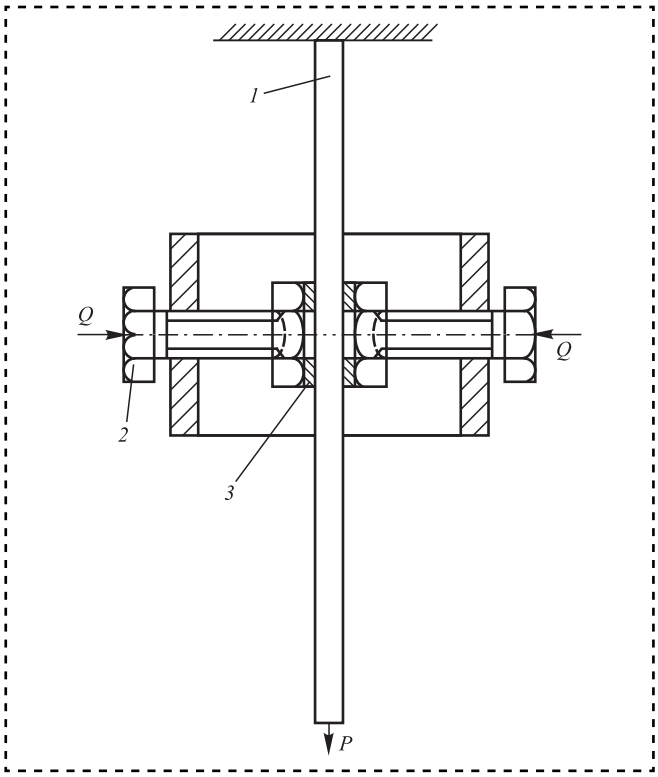


Рис. 4. Схема испытания пластин в условиях фреттинга

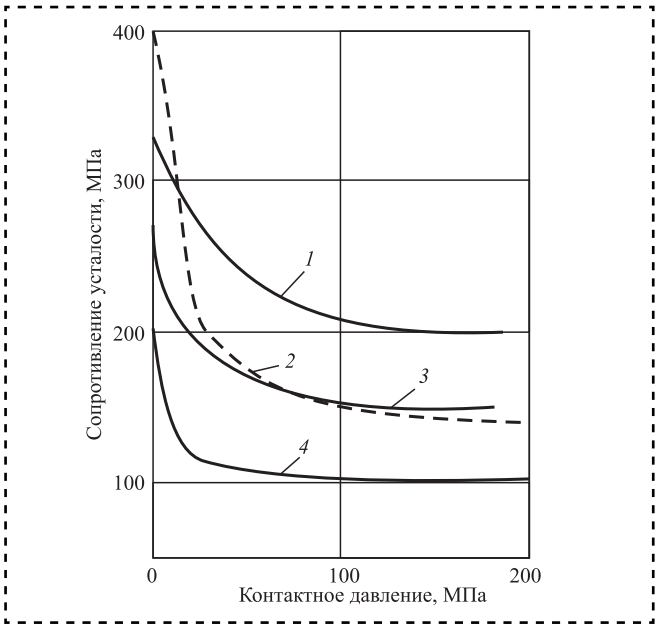


Рис. 5. Влияние контактного давления на сопротивление усталости материалов:
1 — нимоник 90; *2* — титановый сплав; *3* — сталь с 0,57 % С; *4* — алюминиевый сплав

На рис. 5 показано влияние контактного давления p на сопротивление усталости S_N различных материалов [2]. Сопротивление усталости быстро падает с увеличением контактного давления до 70 МПа, а затем стабилизируется. Наименьшее сопротивление усталости характерно для алюминиевого сплава (кривая *4*).

На рис. 6 показано влияние фреттинга на кривую усталости алюминиевого сплава L65 при различных контактных давлениях. Кривая *1* соответствует усталости без фреттинга. Кривые *2—4* соответствуют фреттингу при контактных давлениях 0,14; 3,5 и 110 МПа [1]. Влияние контактного давления на долговечность сплава в условиях фреттинг-усталости существенно. Наблюдается увеличенный наклон кривых фреттинг-усталости. При продолжении усталостных кривых *2*, *3* и *4* до пересечения с кривой *1* можно установить начало фреттинг-усталости: точки *A*, *B* и *C*.

С увеличением контактного давления влияние фреттинга на долговечность сплава наблюдается на более ранней стадии циклического нагружения. Так, при p = 110 МПа $N = 10^4$ циклов, а при p = 0,14 МПа $N = 3 \cdot 10^5$ циклов.

При низких значениях переменного напряжения более важным фактором, определяю-

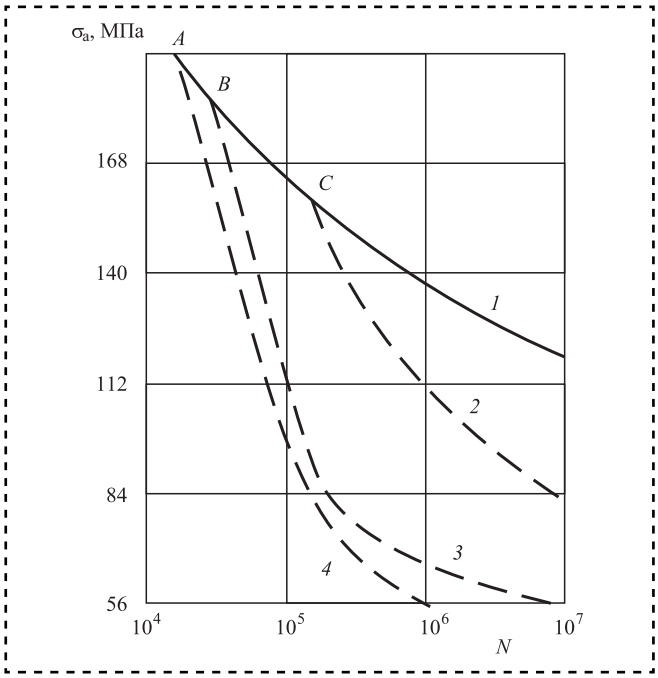


Рис. 6. Усталостные кривые алюминиевого сплава L65 при различных контактных давлениях:
1 — p = 0; *2*, *3*, *4* — p = 0,14; 3,5; 110 МПа

щим сопротивление усталости, является фреттинг. При этом наблюдается более существенное снижение долговечности при фреттинге по сравнению с долговечностью образцов без фреттинга (рис. 6, кривая *1*).

Даже малое контактное давление становится причиной возникновения фреттинга.

Влияние сочетания материалов на фреттинг-процесс

На процесс фреттинга очень сильное влияние оказывают свойства контактирующих материалов [1]. Выбор оптимального сочетания материалов может существенно повлиять на ресурс и надежность болтовых соединений.

На рис. 7 представлен график изменения сопротивления усталости S_N титанового сплава RC130B в зависимости от отношения модуля упругости E_1 различных материалов накладки (сплав алюминия, титана и стали) и материала образца E_2, т.е. (E_1/E_2) при контактном давлении p = 103...150 МПа. Значения сопротивления усталости получены на базе $N = 10^7$ циклов.

Сопротивление усталости образца из сплава RC130B при фреттинге существенно снижается

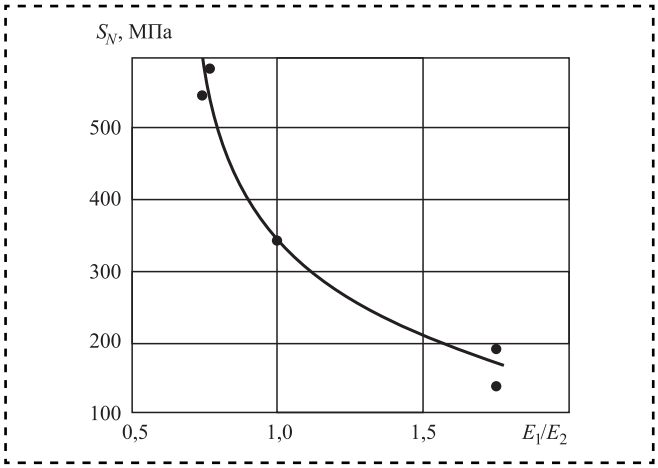


Рис. 7. Изменение сопротивления усталости S_N титанового сплава RC130B в зависимости от модуля упругости E_1 материала накладки

с увеличением модуля упругости накладки. Так, при E_1/E_2 = 1,8 сопротивление усталости снижается в 3 раза по сравнению с E_1/E_2 = 0,64.

Повреждаемость контактной зоны пластины с отверстием из титанового сплава ОТ4-1 в контакте с накладкой (шайбой) из сталей 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654), ВНС-2, 30ХГСА, титанового сплава ОТ4-1 и алюминиевого сплава Д19 в условиях фреттинга оценивали по изменению шероховатости Δh контактной зоны пластины при давлениях p = 20; 60; 140 и 180 МПа [8].

На рис. 8 приведена диаграмма изменения шероховатости поверхности пластины Δh

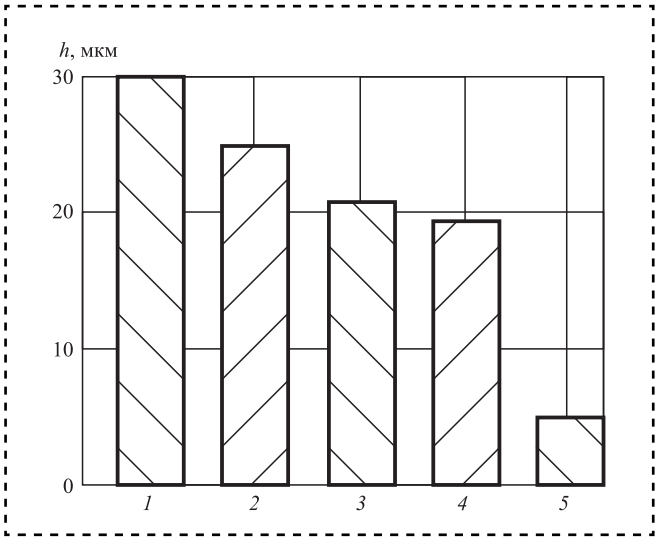


Рис. 8. Диаграмма изменения шероховатости пластины из ОТ4-1 при фреттинге с накладками из материалов:
1 — 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654); *2* — ОТ4-1; *3* — ВНС-2; *4* — 30ХГСА; *5* — Д19

в зоне контакта с накладкой после повреждения образцов при числе циклов фреттинга $N = (120...240)\cdot 10^3$.

При контакте пластины с накладкой из коррозионно-стойкой стали 15Х18Н12С4ТЮ (ЭИ654) наблюдается существенный износ (повреждение) титановой пластины. Значительное повреждение наблюдается также при сочетании одинаковых материалов (ОТ4-1 + ОТ4-1). Накладка из алюминиевого сплава Д19 незначительно повреждает пластины из ОТ4-1.

На рис. 9 приведены результаты испытаний на фреттинг-усталость сплошной полосы из титанового сплава ВТ6 (сплошные линии) и полосы с отверстием из алюминиевого сплава Д16АТ (штриховые линии) при контакте со стандартными шайбами из Д16АТ Ан.Окс. (кривая *1* и *4*), из 30ХГСА Кд (кривая *2* и *5*) и из титанового сплава ВТ3-1 без покрытия (кривая *3*) [4, 7].

Испытания проведены в соответствии со схемой, приведенной на рис. 4, при контактном давлении 108 МПа между шайбой и пластиной из ВТ6 и 45,5 МПа между шайбой и пластиной из Д16АТ. Усталостные кривые получены при

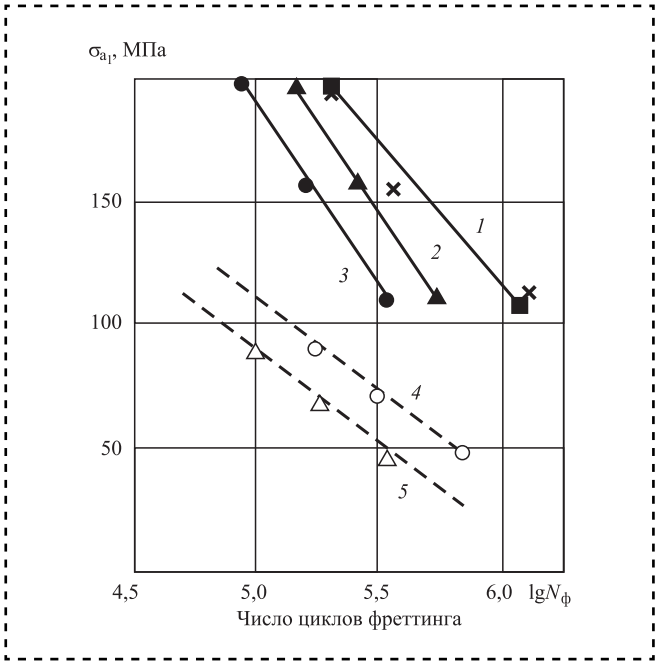


Рис. 9. Результаты испытаний на фреттинг-усталость полосы из ВТ6 (сплошные линии) и полосы из Д16АТ с отверстием (штриховые линии) в условиях фреттинга при соотношении модулей упругости шайбы и пластины E_1/E_2: *1* — 0,55; *2* — 1,6; *3* — 1,0; *4* — 1,0; *5* — 2,9

непрерывном воздействии фреттингом в процессе усталостных испытаний.

Фреттинг-усталость пластин тем ниже, чем выше отношение модулей упругости E_1/E_2 (рис. 9). При этом важным фактором, определяющим усталостное поведение пластины из ВТ6, является контакт с шайбой из ВТ3-1 без покрытия.

Из сравнения кривых *2* (E_1/E_2 = 1,6) и *3* (E_1/E_2 = 1) следует, что фреттинг-усталость полосы при контакте с шайбой без покрытия наименьшая, тогда наименьшая долговечность полосы целиком определяется высокой степенью повреждающего влияния фреттинга и отношение модулей упругости в этом случае является лишь побочным результатом, а не основным фактором. Таким образом, покрытие одной из контактных поверхностей является эффективным средством против фреттинг-усталости.

На основе экспериментальных исследований [4] была предложена эмпирическая зависимость, характеризующая снижение предельной амплитуды циклической нагрузки $\Delta\sigma_{аф}$ при фреттинге для сплава Д16АТ с учетом некоторых факторов:

$$\Delta\sigma_{аф} = 0,85(\lg N)^{0,92}\, p^{0,32} K_п K_ш, \qquad (1)$$

где $K_п$ — коэффициент, учитывающий влияние покрытий и условия внешней среды, $K_п$ = 1 — для образцов без покрытия; $K_п$ = 0,86 — для анодированных образцов; $K_ш$ — коэффициент, учитывающий форму шайбы, $K_ш$ = 1,35 — для кольцевой шайбы; p — контактное давление между шайбой и пластиной.

Формула (1) относится к частному условию фреттинг-усталости и недостаточно полно учитывает влияние шероховатости поверхности пластины Rz, величины модуля упругости шайбы E_1'. Влияние шероховатости и модуля упругости можно учесть путем введения дополнительных коэффициентов:

$$\Delta\sigma_{аф} = 0,85(\lg N)^{0,92}\, p^{0,32} K_п K_ш \frac{1}{K_{F\sigma}} \frac{1}{K_E}. \qquad (2)$$

Значение коэффициента $K_{F\sigma}$, характеризующего снижение пределов выносливости при ухудшении качества обработки поверхности, вычисляется по формуле [10]:

$$K_{F\sigma} = \frac{\sigma_{-1}(Rz)}{\sigma_{-1}(Rz \leqslant 1)}, \qquad (3)$$

где $\sigma_{-1}(Rz)$ — предел выносливости гладкого образца с шероховатостью Rz;

$\sigma_{-1}(Rz \leqslant 1)$ — предел выносливости гладкого, тщательно отполированного образца;

$K_{F\sigma} = 1$ при $Rz \leqslant 1$.

Значения коэффициентов $K_{F\sigma}$ для алюминиевых деформируемых сплавов приведены в таблице [9].

По данным таблицы построен график, выражающий влияние шероховатости Rz поверхности полосы из алюминиевых сплавов на обратный коэффициент качества поверхности $1/K_{F\sigma}$ (рис. 10).

С увеличением высоты неровностей Rz обратный коэффициент качества поверхности $1/K_{F\sigma}$ увеличивается, причем наиболее интенсивно в диапазоне шероховатостей от 1 до 20 мкм.

С увеличением базы испытаний влияние качества поверхности на долговечность образцов усиливается. Так, например, при $N = 10^5$ циклов $K_{F\sigma} = 0{,}92$, а при $N = 2 \cdot 10^7$ $K_{F\sigma} = 0{,}87$ [9]. Это объясняется более высокой чувствительностью к концентрации напряжений материалов при больших долговечностях.

Значения коэффициентов K_{F_σ} для алюминиевых деформируемых сплавов

Параметр шероховатости Rz, мкм	K_F
0,5...1	1,00
1,5...2	0,96...0,98
4...10	0,87...0,94
10...15	0,84...0,88
20...30	0,78...0,83
50...100	0,76...0,75

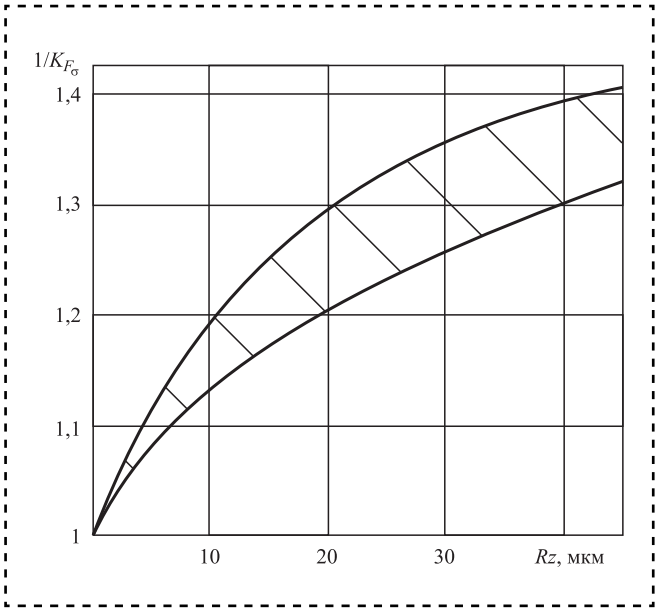


Рис. 10. Влияние шероховатости поверхности алюминиевых сплавов на обратный коэффициент качества поверхности $1/K_{F\sigma}$

По мере снижения вероятности разрушения от 50 до 1 % коэффициент $K_{F\sigma}$ непрерывно возрастает от 0,87...0,92 до 0,91...0,94.

Из-за влияния большего числа случайных факторов установление количественной зависимости уменьшения амплитуды напряжений при фреттинге от отношения модулей упругости шайбы и пластины E_1/E_2 представляет определенную методическую трудность. Практический интерес представляет сравнительная оценка отношения амплитуды напряжений цикла при $E_1/E_2 > 1$ к амплитуде напряжений при $E_1/E_2 = 1$ при заданном числе циклов нагружения N. При этом коэффициент, характеризующий снижение амплитуды напряжений определяется по формуле:

$$K_E = \frac{\sigma_{\text{аф}}\left(\bar{E} > 1\right)}{\sigma_{\text{аф}}\left(\bar{E} = 1\right)}, \qquad (4)$$

где $\sigma_{\text{аф}}$ — амплитуда напряжений цикла при фреттинге; $\bar{E} = E_1/E_2$ — относительный модуль упругости; E_1 и E_2 — модули упругости материала шайбы и пластины.

Экспериментально установлено (см. рис. 9), что при $\bar{E} = 2,8$ величина $K_E = 0,83$.

Уравнение кривой усталости при растяжении гладких образцов из Д16АТ приближенно может быть представлено в следующем виде [9]:

$$\sigma_а = (\sigma_в - \sigma_м)^{0,63}[0,64 + 43,3(\lg N)^{-2,1}], \quad (5)$$

где $\sigma_в$ — предел прочности материала образца;

$\sigma_м$ — среднее напряжение цикла.

Вычитая из уравнения (5) уравнение (2), получаем уравнение усталости пластины из Д16АТ в условиях фреттинга:

$$\sigma_{аф} = (\sigma_в - \sigma_м)^{0,63}\left[0,64 + 43,3(\lg N)^{-2,1} - 0,85(\lg N)^{0,92}\, p^{0,32} K_п K_ш \frac{1}{K_{F\sigma}} \frac{1}{K_E}\right]. \quad (6)$$

Формула (6) может быть использована при прогнозировании долговечности срезных соединений из алюминиевого сплава Д16АТ, когда разрушение происходит не в сечении по оси наиболее загруженного отверстия, а в зоне контакта головки болта или шайбы с элементами стыка.

Библиографический список

1. **Коллинз Дж.** Повреждение материалов в конструкциях. Анализ, предсказание, предотвращение: пер. с англ. М.: Мир, 1984. 684 с.
2. **Уотерхауз Р.Б.** Фреттинг-коррозия: пер. с англ. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.
3. **Григорьев В.П., Киселев Н.М., Порошин С.Н.** Диаграммы выносливости срезного болтового соединения со свободной посадкой болтов // Авиационная промышленность. 1978. Приложение № 1. С. 31—33.
4. **Арсон Л.Д., Вигдорчик С.А., Гребенников А.Г., Стебенев В.Н.** Фреттинг-коррозия и выносливость срезных болтовых соединений // Авиационная промышленность. 1979. № 3. С. 53—56.
5. **Бойцов Б.В., Кишкина С.И., Кравченко Ю.А.** Долговечность шарнирно-болтовых соединений летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1966. 256 с.
6. **Дроздов Ю.Н., Сильверстов И.И., Ушаков Б.Н.** Анализ контактных напряжений в задачах износа и фреттинг-усталость // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 2. С. 50—54.
7. **Гребенников А.Г., Клименко В.Н., Попович В.И., Стебенев В.Н.** Выносливость сплава В16 в условиях фреттинг-коррозии // Вопросы проектирования самолетных конструкций. Харьков: 1978. Вып. 1. С. 114—118.
8. **Петухов А.Н., Порошин С.Н.** Влияние фреттинг-коррозии на повреждаемость контактной зоны и выносливость титановой пластины с отверстием в условиях работы срезного болтового соединения // Авиационная промышленность. 1978. Приложение № 1. С. 47—50.
9. **Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В.** Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973. 320 с.
10. **Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П.** Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.

Читайте в следующем номере:

- **Вавилов В.Е.** Новые технические решения для создания сверхвысокооборотных электромеханических преобразователей энергии
- **Сорокин М.Н.** Селективная сборка: проблемы и перспективы
- **Степанова М.А., Медведев А.М.** Соединения типа press-fit
- **Бохоров И.О., Карабанов В.В.** Пайка трубопроводных систем
- **Плешаков А.А., Кристаль М.Г.** Теоретическая оценка передаточной функции и погрешности измерения автоматического пневмоэлектронного устройства
- **Микаева С.А., Микаева А.С., Бойчук М.И.** Сборка корпусных установок с амальгамными лампами типа УДВ-А для обеззараживания воды ультрафиолетовым излучением

УДК 539.621 + 621.763

Л.Ш. Шустер, *д-р техн. наук,* **Р.Р. Камалетдинова, С.В. Чертовских,** *канд. техн. наук*
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
E-mail: okmim@ugatu.ac.ru

Влияние нефтяной среды на триботехнические характеристики скользящего контакта в запорной арматуре

Выполнены экспериментальные исследования адгезионного взаимодействия фрикционного контакта образцов из стали 12Х18Н10Т и сплава ЖС6У и инденторов из кермета TiC-ЖС6У ("всухую" и в среде сырой нефти). Исследовано влияние материала, температуры, давления и нефтяной среды на триботехнические характеристики скользящего контакта: прочность τ_n адгезионных связей на срез; предельную несущую способность контакта p_m; коэффициент β упрочнения адгезионных связей от действия нормальных сил; прочность τ_0 адгезионных связей при отсутствии нормальных сил; молекулярную (адгезионную) составляющую коэффициента трения. Установлено, что в исследуемых условиях сырая нефть не оказывает существенного влияния на триботехнические характеристики скользящего контакта.

Experimental studies carried out for the adhesive interaction of frictional contact of samples of steel and alloy 12Х18Н10Т and ЖС6У indenters cermet TiC-ЖС6У (dry and medium crude oil).

The influence of the material, temperature, pressure and oil on tribological characteristics of the medium sliding contact: τ_n strength of adhesive bonds on the cut; limit the carrying capacity of the contact p_m; factor β hardening adhesive bonds by the action of normal forces; τ_0 strength of adhesive bonds in the absence of normal forces; molecular (adhesive) component of the coefficient of friction. It was found in the studied conditions, crude oil has no significant effect on the tribological characteristics of the sliding contact.

Ключевые слова: прочность адгезионных связей на срез, молекулярная (адгезионная) составляющая коэффициента трения, коэффициент упрочнения адгезионных связей, трение "всухую" и в среде сырой нефти.

Keywords: bond strength shear, molecular (adhesive) component of the coefficient of friction, hardening coefficient of adhesive bonds, dry friction and medium crude oil.

Современная перерабатывающая промышленность нуждается в износостойких материалах для изделий, эксплуатируемых при воздействии предельно жестких температурно-силовых нагрузок и абразивных сред (например, затворы запорно-регулирующей трубопроводной арматуры, шаровые краны).

Комплексному действию этих факторов способен противостоять, в той или иной степени, весьма узкий круг материалов, включающий высоколегированные стали и сплавы с различными покрытиями, некоторые виды керамики и керамико-металлические материалы (керметы).

Важной технической характеристикой шарового крана и другой запорной арматуры является сила на поворотном штоке при его открытии и закрытии. Она оказывает определяющее влияние на эксплуатационные свойства арматуры: энергозатраты привода, время срабатывания, интенсивность износа, долговечность, надежность и т.п. У шаровых кранов, конструкция которых не дает возможности при необходимости увеличивать (в ущерб компактности) размеры поворотного вала, мощности привода, этот фактор приобретает еще большее значение.

Силы открытия—закрытия зависят не только от габаритных размеров, но в еще большей степени от триботехнических характеристик трущейся пары "шаровой затвор — седло".

Цель работы — определение степени влияния сырой нефти при различных температурах и давлениях на триботехнические характеристики скользящего контакта запорной арматуры.

Методика исследования

Экспериментальные исследования адгезионного взаимодействия выполнены для фрикционного контакта образцов из стали 12Х18Н10Т и сплава ЖС6У и инденторов из кермета TiC—ЖС6У [1] ("всухую" и в среде сырой нефти).

Для проведения исследований адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей применяли установку [2], в которой реализована физическая модель, в первом приближении отражающая реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте, в том числе для тяжело нагруженных трибосопряжений машин и механизмов. Согласно этой модели сферический индентор (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твердых тел), сдавленный двумя плоскопараллельными образцами (с высокой точностью и малой шероховатостью контактирующих поверхностей), вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила $F_{экс}$, необходимая для вращения индентора, связана главным образом со сдвиговой прочностью τ_n адгезионных связей (ГОСТ 27674—88). Установка позволяет осуществлять нагрев зоны контакта и обеспечивать характерное распределение температуры по глубине контактирующих тел.

Для определения зависимости прочности τ_n адгезионных связей на срез от нормальных напряжений p_r на подвижном фрикционном контакте использовали метод постепенно снижающихся нагрузок: от максимальных, соответствующих пластическим деформациям на контакте, до минимально возможных по точности измерительных приборов.

Образцы для исследований представляли собой диски диаметром 20...25 мм и толщиной 5...7 мм, инденторы — цилиндры диаметром 5 мм со сферическими торцами ($R_{сф}$ = 2,5 мм). Исследуемые поверхности имели параметр шероховатости Ra = 0,2...0,4 мкм.

Достоверные данные о величине τ_n (при различных температурах и давлениях) получаются при 2—3-кратном повторении эксперимента; при этом вероятное отклонение не превышает 8...5 %.

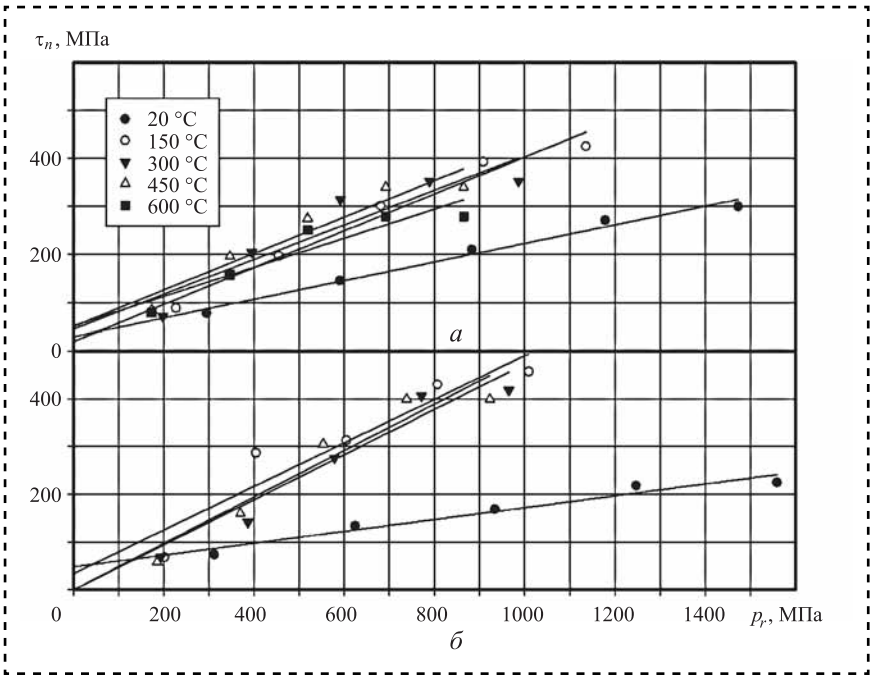


Рис. 1. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта индентора TiC—ЖС6У с образцом 12Х18Н10Т:
а — без нефти; *б* — с нефтью

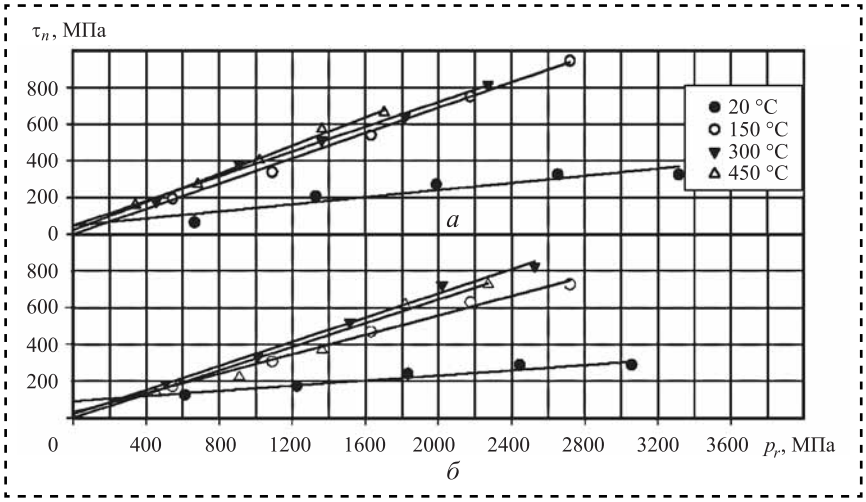


Рис. 2. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей при различных температурах контакта индентора TiC—ЖС6У с образцами ЖС6У:
а — без нефти; *б* — с нефтью

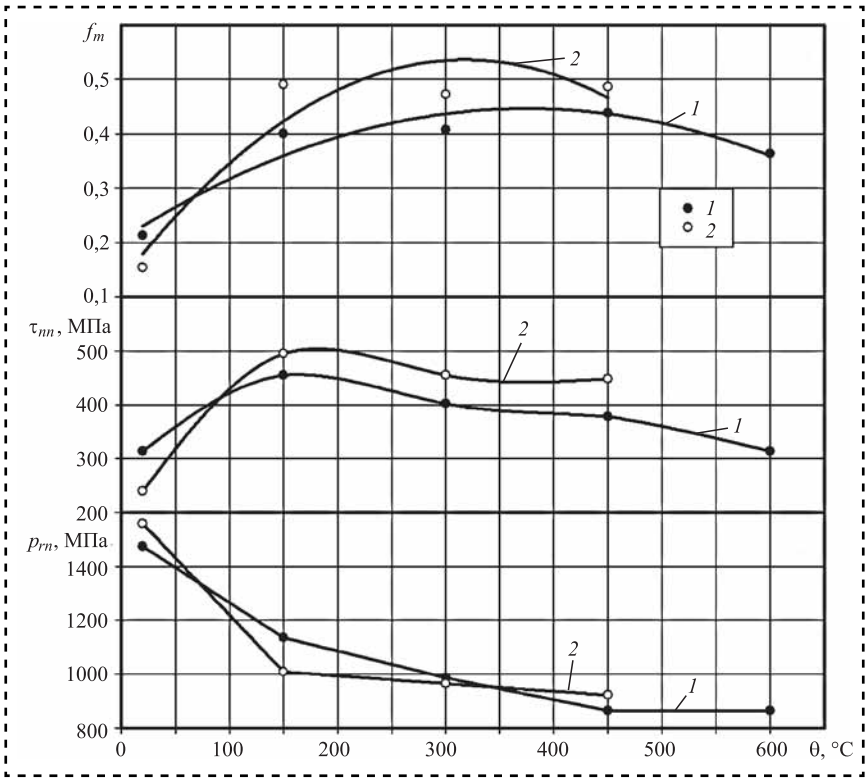


Рис. 3. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта индентора TiC—ЖС6У с образцами 12Х18Н10Т: *1* — без нефти; *2* — с нефтью

Перед каждым опытом сырую нефть кисточкой наносили на образцы и индентор. После опыта исследуемые поверхности протирали спиртом для обезжиривания, и опыты повторяли "всухую" (для сравнения результатов).

Обсуждение полученных результатов

При трении "всухую" и в среде сырой нефти (рис. 1, 2) зависимость прочности τ_n адгезионных связей на срез от нормального давления p_r имеет прямо пропорциональный характер и описывается биноминальной функцией со свободным членом τ_0 и коэффициентом β:

$$\tau_n = \tau_0 + \beta p_r.$$

На рис. 3 и 4 представлены результаты адгезионных

Результаты исследования адгезионного взаимодействия при трении

Образец	θ, °C	p_{rn}, МПа	τ_{nn}, МПа	f_m	β	τ_0, МПа
Сталь 12Х18Н10Т и индентор TiC—ЖС6У						
12Х18Н10Т	20	1474	314	0,213	0,194	29
	150	1136	455	0,400	0,384	19
	300	987	402	0,407	0,361	45
	450	865	378	0,438	0,380	50
	600	865	314	0,363	0,303	52
12Х18Н10Т (нефть)	20	1559	240	0,154	0,124	48
	150	1009	495	0,490	0,456	34
	300	965	455	0,472	0,472	0
	450	923	448	0,486	0,486	0
Сплав ЖС6У и индентор TiC—ЖС6У						
ЖС6У	20	3316	369	0,111	0,097	47
	150	2720	938	0,345	0,345	0
	300	2271	812	0,358	0,337	47
	450	1702	676	0,397	0,384	22
ЖС6У (нефть)	20	3056	310	0,101	0,072	90
	150	2720	747	0,275	0,264	29
	300	2526	850	0,337	0,329	19
	450	2271	731	0,322	0,322	0

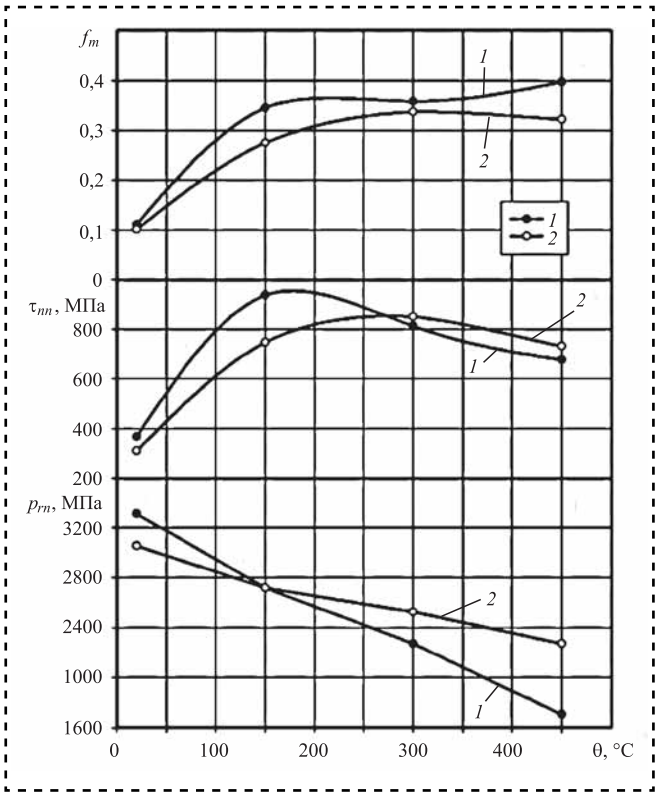


Рис. 4. Влияние температуры контакта на триботехнические характеристики фрикционного контакта индентора TiC—ЖС6У с образцами ЖС6У:
1 — без нефти; *2* — с нефтью

исследований, полученные в экстремальных условиях нагружения (при вырожденном за счет релаксации пластическом контакте [2]), т.е. по максимальным значениям величин на графиках $\tau_n = f(p_r)$ из рис. 1 и 2. Наличие сырой нефти на исследуемых поверхностях не оказывает существенного влияния на триботехнические параметры изучаемых пар трения (таблица).

В результате этого при нагружении в экстремальных условиях (вырожденного пластического контакта — при давлении p_{rn}) характеристики адгезионного взаимодействия при трении, полученные "всухую" и при наличии нефтяной среды, незначительно отличались по величине (не более чем на 20 %) в исследованном диапазоне температур θ контакта.

Следовательно, результаты исследований по адгезионному взаимодействию в условиях отсутствия нефти вполне применимы для оценки трения в среде сырой нефти.

Вывод

В тяжело нагруженных трибосопряжениях сырая нефть не оказывает существенного влияния на триботехнические характеристики скользящего контакта.

Библиографический список

1. **Мамлеев Руст.Ф., Мамлеев Раф.Ф., Наширванов Р.Г.** Изделия из высокотемпературных керметов TiC—Me для нефтепереработки и нефтехимии // Нефтепереработка и нефтехимия. 2010. № 4. С. 33—38.

2. **Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазка в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 04.02.2016. Подписано в печать 04.04.2016. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.