ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ

И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ

ЖУРНАЛ



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

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Технологичность конструкции изделия и САПР 3

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Кочкин Е.В., Матвеев Е.В., Медарь А.В., Меденков В.И. Практическая реализация принципа совмещения контрольно-измерительных технологий

Соединение деталей машин

Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Сборка соединений многопроволочных проводов давлением импульсного магнитного поля 12

Трение и смазка в машинах и механизмах

Берент В.Я. Процессы, протекающие на поверхностях трения медного				
контакта с порошковым на железной основе 19				
Дунаев В.В., Пучков В.Н. Контактные взаимодействия элементов				
срезного болтового соединения в условиях фреттинг-изнашивания				
Буланов Э.А. Давление сыпучего тела на стенки силоса. Плоская задача 32				

В помощь конструктору, технологу

Емельяненко А.А., Жабин О.И., Ярошик Д.В. Способ обеспечения прочности пластиковых корпусов-оболочек гидроакустических приборов 39 Зеленко Г.В., Кадиев А.Р., Рощин А.А., Рощин А.В. Поиск оптимального пути в графе сенсорной локальной сети для оценки ее работоспособности ... 43

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 MOCKRA

А.С. ВАСИЛЬЕВ

(павный 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. ИА ПЮБИНИН КТН 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 БЕЛГОРОЛ

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. KORPOR

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.

OMCK В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н. OPFO

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. **NFPMh**

С.М. БЕЛОБОРОДОВ, 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.



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. CAMAPA

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. TOMCK

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.

Беларись МИНСК

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

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н. Украина

KNEB 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

THE MONTHLY **JOURNAL** FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MA

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION



CONTENTS

Manufacturability of a construction

Samarkina E.I., Samarkin A.I., Dmitriyev S.I., Evgenyeva E.A. Technologi-

Quality assurance. Testing. Monitoring

Kothkin E.V., Matveev E.V., Medar A.V., Medenkov V.I. Practical achievement principle combination checking technology at assembly production machine-

Connection of mashines parts

Samohvalov	V.N.,	Samohvalova	Zh.V.	Assembly	stranded	wire	pressure	
pulsed magne	etic fiel	d						12

Friction & lubrication

Berent V.Ya. Processes, occurring on the surface of the copper contact friction	
with the powder on an iron basis	19
Dunaev V.V., Puchkov V.N. Contact interaction of shear bolted joint connection	
at the condition of fretting-wear	27
Bulanov E.A. Pressure loose body against the walls of the silo. Flat problem	32

Industrial and design engineer's aid

Emelyanenko A.A., Jabin O.I., Yaroshik D.V. The way to ensure the strength Zelenko G.V., Kadiev A.R., Roschin A.A., Roschin A.V. The search of the optimal path in the graph of the sensor local network in order to estimate its

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 MASCOW

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 **Regional editors REI CORON** 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. KOSTYUKOV OREL

Yu.S. STEPANOV G.A. KHARLAMOV ORENBURG

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

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

A V IGNATOV 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

PERM S.M. BELOBORODOV V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON

V.I. KOLESNIKOV A.A. RYZHKIN RVBINSK

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 Relarus

MINSK V.L. BASINJUK M.L KHEIFETZ

GOMEL V.E. STARZHINSKI Ilkraine

KIFV A.S. ZENKIN V.A. MATVIENKO

DONETSK A.N. MIKHAILOV

Poland P. LEBKOVSKI

E. LUNARSKII

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

УДК 658.512

Е.И. Самаркина, А.И. Самаркин, С.И. Дмитриев, канд-ты техн. наук, Е.А. Евгеньева (Псковский государственный университет) *E-mail: dmitrievsi*55@gmail.com

Технологичность конструкции изделия и САПР

Рассматриваются возможности использования систем автоматизированного проектирования технологических процессов для анализа технологичности конструкции изделий в машиностроении.

Possibilities of the use of computer-aided of technological processes designs are examined for the analysis of technologicalness of construction of wares in an engineer.

Ключевые слова: технологичность конструкции, автоматизированное проектирование, компьютерное моделирование.

Keywords: technologicalness of construction, automated planning, computer design.

Идеи всесторонней проработки конструкции изделия на технологичность существуют достаточно давно как за рубежом, так и в отечественной промышленности. Понятие "технологичность" является комплексным: технологичность изделия с точки зрения простоты или сложности его изготовления, простоты сборки, технологичность в аспекте достижения заданного качества и др.

Проектирование технологического процесса изготовления детали начинается с оценки технологичности конструкции. Конструкция детали технологична, если при ее изготовлении затраты материала, времени и средств минимальны, что традиционно оценивается путем расчета себестоимости изготовления единицы продукции. Анализ технологичности конструкции связывает работу конструктора и технолога с условиями предприятия, на котором будет производиться изделие. Другими словами, технологичность — соответствие конструкции требованиям производства.

В разных производственных условиях технологичными могут оказаться различные варианты конструкции, причем под условиями производства следует понимать не только чисто технологические его возможности, но и систему конструкторско-технологической подготовки производства. В настоящее время труд конструктора и технолога сочетается с применением систем компьютерного проектирования и расчета (САD, САМ и САЕ). Отработка на технологичность — один из ответственных и сложных этапов.

Современные системы твердотельного параметрического моделирования позволяют разработать "цифровой прототип" изделия, который отражает его геометрию и дополнительно несет конструкторско-технологическую информацию о допусках размеров, схеме их простановки, требованиях к качеству исполнения поверхностей. Корректная объемная модель и владение методом конечных элементов (с соответствующим программным обеспечением) позволяют поставить и решить задачу о минимизации массы изделия (как в виде параметрической оптимизации, так и в виде топологической оптимизации). Для решения второй задачи (унификации) уже требуется опыт и своего рода "видение" конструкций выпускаемых изделий.

Задача усложняется тем, что в идеале конструкция изделия должна быть технологичной не только при изготовлении и сборке, но



изготовления — нет. Ведь кроме усложнения конструкции и увеличения трудоемкости изготовления ступенчатой поверхности самой гильзы требуется выполнение подобного отверстия и в корпусе. Кроме того, появляется задача обеспечения и измерения соосности как в гильзе, так и в отверстии корпуса, что весьма трудоемко.

За рубежом в настоящее время интерес к тематике технологичности не угасает даже у достаточно успешных производителей, потому что целесообразность вложения ресурсов в решение таких задач очевидна. Технологичные детали выгодны и заказчику, и исполнителю. Технологичность является составной частью более общей экспертизы при освоении нового продукта, которая получила название IPD (integrated product development). Осознание того факта, что для принятия всесторонне взвешенных конструкторских решений необходимы адекватные всесторонние знания и опыт, которые не могут быть охвачены рядовым конструктором, привело к тому, что сегодня на рынке существуют компании, которые специализируются на решении подобных задач. Область знаний, ориентированная на обеспечение технологичности конструкции, получила название DFM (Design for manufacturing). DFM описывает процесс разработки изделия с точки зрения облегчения процесса производства с целью снижения затрат на его изготовление. В противовес итеративному проектированию, когда инженер-конструктор отправляет созданную модель или сборку в производство для согласования и получения обратной связи, задача DFM — сократить, а в идеале — ликвидировать этот этап [2].

Существуют попытки автоматизировать анализ технологичности с помощью САПР-систем. известные системы Однако ориентированы только на отдельные области. Например, Autodesk Simulation DFM — приложение, помогающее разрабатывать изделия из пластмассы и создавать цифровые прототипы, в которых учитывается технологичность изготовления отливок, включая как технологичность конструкции детали, исходя из ее проливаемости, так и технологичность конструкции прессформы для пластмассового литья.

Другим примером является программный комплекс DFMPro (Geometric Americas, Inc.), который содержит базы знаний для различных технологических процессов: обработка (фрезерование, токарная обработка, сверление), литье под давлением пластмасс, изготовление компонентов из листового металла и поставляется с предварительно настроенными правилами сборки (DFA). Правила проектирования сформированы на основе различных справочников и руководств и содержат знания DFM-консультантов — экспертов в своих областях. DFMPro также способен работать как инструмент накопления знаний собственных практик предприятия.

Отработка на технологичность обычно проводится в два этапа. Первый этап — качественный анализ конструкции с точки зрения возможности ее изготовления на данном предприятии, исходя из существующего оборудования и оснастки. Второй этап — количественная оценка технологичности по различным показателям. Наиболее простым этапом для автоматизации является этап количественной оценки.

Для количественной оценки технологичности детали ГОСТ 14.201-83 рекомендует различные коэффициенты: использования материала, точности, шероховатости, унификации. Эти коэффициенты не сложные для расчета и являются довольно информативными показателями. Для автоматизации количественной оценки технологичности известны системы КОМПАС и ВЕРТИКАЛЬ [1], в которых рассчитывается коэффициент использования материала. Для определения других коэффициентов достаточно чертежа или модели с размерами и техническими условиями.

В КОМПАСе есть справочник, из которого конструктор выбирает допуски и посадки, а значит, существует принципиальная возможность подсчета использованных допусков, посадок и требований к взаимному расположению и качеству поверхностей (рис. 1, *a* на стр. 2 обложки), их сортировке и классификации. Аналогично можно определить коэффициент шероховатости, если шероховатость проставляется на чертеже или модели с использованием справочника.

Коэффициент унификации конструкторских элементов показывает число унифицированных поверхностей. Этот коэффициент можно определить, если при конструировании использовался модуль КОМПАС-Shaft 2D или 3D. Библиотечные элементы, создаваемые с помощью модуля, стандартны и унифицированы и их число, использованное в конструкции, не сложно подсчитать (рис. 1, δ на стр. 2 обложки).

Значения всех коэффициентов сравнивают с нормативными с учетом типа производства. Результат — подсказка технологу, что по такому-то показателю деталь нетехнологична, недостаточно технологична, технологична. Решение принимает технолог, но время на принятие решения уже значительно сокращается за счет автоматизированного расчета. Таким образом, системы автоматизированного технологического проектирования, в том числе КОМПАС и ВЕРТИКАЛЬ, остаются продуктами, облегчающими труд технолога, но не автоматизирующими его.

Приведенные коэффициенты не исчерпывают всего существующего перечня оценок технологичности, но являются наиболее удобными с точки зрения математических расчетов, данные для которых можно получить с модели детали. Оценка основных показателей технологичности, а именно трудоемкости изготовления и технологической себестоимости, до разработки технологического процесса может проводиться только по процессам-аналогам, что составляет определенную трудность. Определение технологичности сборочной единицы — еще более сложная задача и требует отдельного рассмотрения и анализа.

Автоматизация, даже частичная, качественной отработки конструкции детали на технологичность проблематична. В настоящий момент возможен вариант — сравнение в автоматизированном режиме заданных полей допусков с технологическими возможностями оборудования [1]. Для этого в справочнике по оборудованию следует предусмотреть возможность указания паспортных данных по точности каждого экземпляра оборудования. Кроме того, требуется разработать процедуру сравнения данных чертежа (модели) с данными справочника. Например, при указании на определенной поверхности размера с определенным полем допуска система должна показать технологу все оборудование его участка, обеспечивающее такую точность при обработке указанного размера. Эта процедура в дальнейшем может существенно упростить стратегию обработки за счет исключения избыточных операций.

Существующие в настоящее время САПР ТП значительно облегчают труд технолога и конструктора.

Системы 3D САПР предоставляют возможности моделирования сложных конструкций с минимальными трудозатратами, но легкость в моделировании не должна снимать ответственности конструктора за правильную с точки зрения изготовления проработку геометрии. На производстве часто приходится сталкиваться с моделями деталей, которые насыщены геометрическими элементами, не влияющими на функциональность изделия, но затраты на их обработку могут превышать разумные пределы.

Появление нетехнологичных изделий может быть обусловлено незнанием или пренебрежением технологическими возможностями предприятия или технологичностью в целом либо небрежностью моделирования. Например, конструктору поставлена задача проектирования изделия, детали которого должны быть обработаны на станках с ЧПУ. В первую очередь модель должна быть конструктивно точной, не допускающей геометрических разночтений. Это обусловлено спецификой создания управляющих программ в САМ-системах. Они формируются на основе геометрии 3D-модели (рис. 2 на стр. 2 обложки) [2]. Если ребро образовано "вогнутой комбинацией поверхностей", то такие места часто не могут быть получены фрезерованием (по крайней мере трехосевым). В результате согласований конструктор вынужден смириться с тем, что в этих местах после выполнения механообработки будут скругления. Величина скруглений будет соответствовать радиусу инструмента (минимум). Если деталь насыщена такими элементами, то положение центра масс, как и сама масса фактической детали, может



значительно отличаться от расчетных значений.

Проблема фрезерования внутренних углов присуща конструкциям, для которых важны масс-инерционные характеристики. Необходимо принять правило моделирования: для всех внутренних ребер назначаем скругления. Можно ли выполнить обработку именно так, как заложено в модели конструктором на рис. 3, *a* (см. стр. 3 обложки), где отсутствуют скругления в углах? Можно, например, использовать электроэрозионные прошивочные станки. Ввести в технологический процесс дополнительные операции, разработать комплект электродов, изготовить электроды и т. д., затратив немалые средства. Та же деталь в технологичном исполнении представлена на рис. 3, *б* (см. стр. 3 обложки).

Требования к технологичности деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, существенно отличаются от требований при использовании обычных станков. Так, например, для универсальных станков нетехнологичными являются сложные контуры деталей и криволинейные поверхности, описываемые математическими зависимостями (резьбы с переменным шагом, спирали и т.п.), тогда как для станков с ЧПУ такие детали технологичны. Значительно большее значение для обработки на станках с ЧПУ имеет унификация размеров (канавок, фасок, галтелей и т.п.).

Кроме требований к технологичности деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, с точки зрения обработки, необходимо дополнительно учитывать следующее:

• возможность автоматического контроля, захвата и транспортирования заготовок при изготовлении;

• надежное дробление и удаление стружки;

• максимальное упрощение программирования;

• обеспечение благоприятных условий работы режущего инструмента.

Комплекс критериев технологичности деталей, обрабатываемых на станках с ЧПУ, делится на две группы. Первая группа критериев определяет общие требования к детали; во вторую группу входят критерии технологичности, относящиеся к обрабатываемой поверхности.

К общим требованиям относятся:

• обоснованный выбор материала детали и увязка требований качества поверхностного слоя с маркой материала;

• обеспечение достаточной жесткости конструкции;

• наличие или создание искусственных надежных технологических баз, используемых при обработке и захвате заготовки промышленным роботом;

• наличие элементов, удобных для закрепления заготовки в приспособлении, причем зажимные элементы должны обеспечивать доступ для обработки всех поверхностей детали;

• возможность обработки максимального числа поверхностей с одного установа с использованием в основном консольно закрепленного инструмента;

• отсутствие или сведение к минимуму глухих отверстий и отверстий, расположенных не под прямым углом к обрабатываемой поверхности;

• максимально возможная унификация формы и размеров обрабатываемых элементов для обеспечения минимального числа инструментов и использования типовых подпрограмм;

• задание координат обрабатываемых элементов с учетом возможностей устройства ЧПУ станка;

• форма детали должна быть удобной для автоматического контроля и обеспечения легкого удаления стружки.

Технологичность — понятие локализованное. То, что является технологичным для одного предприятия, для другого может быть задачей неразрешимой. В свою очередь для отдельно взятого предприятия технологичность конструкции не может рассматриваться в отрыве от возможностей имеющегося оборудования и оснастки.

Уровень автоматизации анализа технологичности конструкции изделия при изготовлении еще низок. Анализ технологичности остается почти исключительной прерогативой человека. Человеческий фактор — самое уязвимое звено в цепи "проект—изделие".

Библиографический список

1. **О развитии** САПР ТП или автоматизация автоматизированных систем // И. Зинина. 2010. [Электронный pecypc]. URL: http://www.cadcamcae.lv/N57/8.htm.

2. Сморыго А.Э. Как получить дополнительную прибыль на машиностроительном или приборостроительном предприятии. Проблемы 3D-моделирования // Экспозиция Металлообработка. № 7 (100). 2013. С. 35—41.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

УДК 629.7:658.562:658.515:621.91

Е.В. Кочкин, Е.В. Матвеев, канд-ты техн. наук, А.В. Медарь, д-р техн. наук, В.И. Меденков ("НПО Техномаш", Москва) E-mail: tm230@yandex.ru

Практическая реализация принципа совмещения контрольно-измерительных технологий в сборочном производстве изделий машиностроения

Представлены технические характеристики и описание конструкции стенда масс-инерционного контроля, предназначенного для определения трех координат центра масс, осевых, центробежных, главных центральных моментов инерции и направлений главных центральных осей инерции изделий.

Presents technical capability and description construction stand mass inertial inspection for determination three coordinate center of mass, axial, centrifugal, main central moment of inertia and direction main central axis of inertia constructions.

Ключевые слова: массовые характеристики, центр масс, координаты центра масс, сборочное производство, инерционные характеристики, осевые моменты инерции.

Keywords: mass capability, center of mass, coordinate center of mass, assembly manufacture, inertial capability, axial moment of inertia

Процесс эволюции техники, которому свойствены саморегулирование и самоограничение, редко продолжается неснижающимися темпами и имеет, как правило, пределы и различного рода препятствия. Основные из них — фиксированность формы технологии и сложность ее структуры. В этом случае слияние (совмещение) двух (или более) технологий упрощает общую схему устройства их реализующего (по сравнению с группой устройств, реализующих эти технологии по отдельности) и отодвигает пределы, ограничивающие его эволюцию. Так же часто причина совмещения технологий — общность преследуемой цели.

Перспективным является создание совмещенных технологий и стендового оборудования, позволяющих на новом качественном уровне контролировать весь комплекс технических характеристик изделий: на базе единого физического принципа, реализованного в одной конструкции (совмещение в пространстве и времени); на базе различных физических принципов, реализованных в единой конструкции (совмещение в пространстве); на базе объединения в единой конструкции двух различных стендов (условное совмещение в пространстве) [1, 2].

Практическую реализацию принципа совмещения в производстве наглядно иллюстрирует разработка автоматизированного стенда контроля массовых и инерционных характеристик изделий, предназначенного для определения действительных значений массы, трех координат центра масс и моментов инерции изделия относительно шести непараллельных осей. По результатам измерений на стенде вычислены: тензор инерции изделия в центре масс, направления главных центральных моментов инерции, главные центральные моменты инерции, а также рассчитаны балансировочные грузы для статической и динамической балансировки изделия относительно трех осей системы координат изделия.



Технические характеристики стенда

Диапазон масс испытываемых изделий при определении массы и координат Диапазон горизонтальных координат *У* и *Z* испытываемых изделий, мм. ± 100 Диапазон вертикальных координат Х испытываемых изделий, мм 0...1500 Погрешность определения массы Погрешность определения координаты Х Погрешность определения координат *Y* и *Z* центра масс изделий, мм $\pm 0,1$ Погрешность определения моментов инерции изделий в диапазоне масс изделий Диапазон измеряемых моментов инерции, Габаритные размеры стенда (по фундаменту), мм..... 2000×3000 Высота стенда, мм 1600 Масса стенда с опорной плитой, кг, Электрическое сопротивление от фланца переходника до заземляющего контура, Ом, Максимальный угол наклона

Стенд может быть применен для изделий различных конструкций при использовании соответствующих переходников для их крепления к платформе. Он представляет собой уравновешивающее устройство, имеющее установленный в подшипниках на двух опорных стойках крестообразный стол, уравновешенный относительно общей оси подшипников, являющейся осью наклона стола. Третья боковая опорная стойка — подвижная, представляет собой домкрат, наклоняющий стол на угол от 0 до 20°. Платформа на столе стенда для установки изделия расположена с известным смещением относительно оси наклона.

Измерение координат центра масс проводят методом уравновешивания изделия относительно оси наклона стола стенда в четырех различных положениях и измерения углов наклона стола от начального горизонтального положения до равновесного. В различные положения изделие приводится поворотом платформы. В качестве начала отсчета угла наклона используется горизонтальное положение стола, а положение равновесия определяют по показанию силоизмерительного датчика в бо-ковой опоре.

Массу измеряют с помощью уравновешивания изделия после установки на стол на известном расстоянии от оси наклона эталонного груза с известной массой.

Для измерения моментов инерции в конструкции стенда применяют пружинный узел в составе стола, который крепят к четвертой неподвижной стойке после приведения стола с изделием в положение равновесия. При этом образуется колебательная система, подвижная часть которой — стол с изделием, совершающий упругие крутильные колебания относительно оси наклона под действием упругости пружинного узла, соединяющего стол с неподвижной стойкой. По результатам измерения периодов колебаний стола с изделием определяют момент инерции изделия.

Схема устройства показана на рис. 1. Стенд содержит стол *1*, опирающийся на стойки *2* посредством подшипниковых узлов *3*, геометрическая ось *4* поворота подшипниковых узлов является осью наклона стола. На столе эксцентрично с осью наклона *4* расположена поворотная платформа *5*. Платформа *5* поворачивается вокруг оси *7* и фиксируется в четырех положениях: 0, 90, 180 и 270°. На платформе переходник *8* служит для установки изделия *9*.

В горизонтальное и наклонное положения стол стенда приводится подвижной частью 10 боковой стойки 11, которая, нажимая сверху на ролик 12, наклоняет стол на угол от 0...20°. Ось $O_c Y_c$ стола стенда в горизонтальном положении расположена под углом $\lambda = \text{const} \approx 10^\circ$ к оси, проходящей через центр опорного ролика перпендикулярно к оси 4 наклона стенда.

При определении координат центра масс изделия при приближении к углу равновесия стола с изделием измеряют силу взаимодействия ролика и опоры датчика силы 13, а угол положения равновесия — датчиком угловых перемещений в составе подшипникового узла 3.

Запись результатов показаний датчиков угла и силы проводят при установившихся значениях после прекращения внутренних колебаний стола стенда, опирающегося на обладающий упругостью датчик силы. При воз-



Рис. 1. Схема стенда с изделием и переходником при горизонтальном положении стола

никновении внешних причин колебаний в результате сейсмовибраций следует дождаться их прекращения, после чего записать результаты показаний датчиков угла и силы. В случае непрекращающихся колебаний из-за сейсмовибраций, если их амплитуда не превышает величин, сравнимых с паспортной погрешностью измерений датчика угла, в качестве результатов принимаются средние значения измерений за 3 с.

Осевые моменты инерции изделия определяют после нахождения массы и координат центра масс изделия. Принцип определения осевых моментов инерции на стенде основан на измерении периодов колебаний подвижной системы относительно горизонтальной оси



под действием прикрепленного к подвижной системе упругого элемента, состоящего из четырех пружин *1* (рис. 2). В состав подвижной системы входят стол стенда, переходник и измеряемое изделие. Подвижная система приводится в положение неустойчивого равновесия относительно оси колебаний (оси наклона). В этом положении пружинный блок, связанный со столом стенда, за центральный шток *2*, крепится к неподвижному основанию, обеспечивая упругую связь.

После отклонения стола от положения равновесия на него действует суммарный момент силы тяжести изделия и переходника и упругий возвращающий момент пружинного блока. Стол с изделием приходит в колебательное движение. По периодам колебаний, коэффициенту жесткости пружинного блока и известному моменту инерции стола с переходником определяют момент инерции изделия относительно оси, проходящей через центр масс изделия и параллельной оси колебаний стенда.



Рис. 2. Устройство стенда для контроля моментов инерции

Для определения центробежных моментов инерции изделия находят шесть осевых моментов инерции $J_1, J_2, ..., J_6$ относительно шести осей, в системе координат изделия эти оси пересекаются в точке, совпадающей с его центром масс:

$$J_{xx}l_{1}^{2} + J_{yy}m_{1}^{2} + J_{zz}n_{1}^{2} - 2J_{yz}m_{1}n_{1} - 2J_{zx}n_{1}l_{1} - 2J_{xy}l_{1}m_{1} = J_{1};$$

$$J_{xx}l_{2}^{2} + J_{yy}m_{2}^{2} + J_{zz}n_{2}^{2} - 2J_{yz}m_{2}n_{2} - 2J_{zx}n_{2}l_{2} - 2J_{xy}l_{2}m_{2} = J_{2};$$

$$J_{xx}l_{3}^{2} + J_{yy}m_{3}^{2} + J_{zz}n_{3}^{2} - 2J_{yz}m_{3}n_{3} - 2J_{zx}n_{3}l_{3} - 2J_{xy}l_{3}m_{3} = J_{3};$$

$$J_{xx}l_{4}^{2} + J_{yy}m_{4}^{2} + J_{zz}n_{4}^{2} - 2J_{yz}m_{4}n_{4} - 2J_{zx}n_{4}l_{4} - 2J_{xy}l_{4}m_{4} = J_{4};$$

$$J_{xx}l_{5}^{2} + J_{yy}m_{5}^{2} + J_{zz}n_{5}^{2} - 2J_{yz}m_{5}n_{5} - 2J_{zx}n_{5}l_{5} - 2J_{xy}l_{5}m_{5} = J_{5};$$

$$J_{xx}l_{6}^{2} + J_{yy}m_{6}^{2} + J_{zz}n_{6}^{2} - 2J_{yz}m_{6}n_{6} - 2J_{zx}n_{6}l_{6} - 2J_{xy}l_{6}m_{6} = J_{6},$$

где J_{xx} , J_{yy} , J_{zz} — осевые моменты инерции относительно осей системы координат изделия;

 J_{yz} , J_{zx} , J_{xy} — центробежные моменты инерции относительно координатных плоскостей системы координат изделия;

 $l_i = \cos \alpha_i, m_i = \cos \beta_i, n_i = \cos \gamma_i$ — направляющие косинусы шести осей колебаний в системе координат изделия;

α_i, β_i, γ_i — углы между осями колебаний и осями системы координат изделия.

По результатам измерений расчитывают тензор инерции и направления главных центральных осей инерции.

Программное обеспечение стендового оборудования совместимо с операционной системой Microsoft Windows и предназначено для решения задач: сбора данных с первичных преобразователей (датчиков угла, сил и др.); управления двигателями и другими исполнительными устройствами; вычисления массы и координат центра масс и моментов инерции испытуемого изделия; визуального отображения этапов и результатов измерений.

Размещенное в цехе действующее оборудование показано на рис. 3 на стр. 3 обложки.

Практическое применение разработанного стендового оборудования для определения и контроля масс-инерционных характеристик космических аппаратов (в диапазоне масс 50...1000 кг) позволяет сократить номенклатуру используемого технологического оборудования (вместо двух стендов типа ССБМ и СИМИ используется один стенд) и, как следствие, уменьшить трудоемкость и время проведения контрольно-измерительных операций, а также сократить производственные площади, занимаемые под участок контроля масс-инерционных характеристик.

Библиографический список

1. Медарь А.В. Технология и оборудование определения и контроля характеристик геометрии масс изделий в сборочном производстве // Технология машиностроения. 2015. № 2. С. 46—49.

2. Кочкин Е.В., Матвеев Е.В., Медарь А.В., Меденков В.И. Технологическая платформа стендового оборудования для определения характеристик геометрии масс изделий ракетно-космической техники // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 12. С. 3—7.

СОЕДИНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

УДК 621.315.682: 621.7.044.7

В.Н. Самохвалов, д-р техн. наук (Самарский национальный исследовательский университет им. С.П. Королева), Ж.В. Самохвалова, канд. техн. наук (Самарский государственный университет путей сообщения) E-mail: samohvalov_vn@mail.ru

Сборка соединений многопроволочных проводов давлением импульсного магнитного поля

Представлены результаты численного моделирования и экспериментальных исследований процесса магнитно-импульсной сборки соединений многопроволочных проводов и результаты их тепловых и электрических испытаний.

Results of numerical simulation and experimental studies of the process of magnetic-pulse build connections stranded wires and the results of their thermal and electrical tests.

Ключевые слова: трубчатые соединители, магнитно-импульсный метод, сборка.

Keywords: tubular connectors, magnetic pulse method, assembly.

Многопроволочные провода широко используют в линиях электропередачи, контактной сети железных дорог и городского электротранспорта, различных электрических устройствах. Высокое качество сборки соединений проводов различного сечения и из различных материалов обеспечивают процессы холодного прессования. Прессуемые зажимы прочны, легки, экономичны, не требуют обслуживания, имеют неснижающееся качество получаемых токоведущих соединений, устойчивы к коррозии и воздействию токов короткого замыкания. Для повышения эксплуатационной надежности прессуемых зажимов предложен метод магнитно-импульсной сборки соединений многопроволочных проводов [1, 2].

В отличие от обжатия соединительных втулок на прессе, при воздействии давления импульсного магнитного поля цилиндрическая часть соединительной втулки или наконечника деформируется равномерно по окружности, обеспечивая электрический контакт по всем жилам провода. В результате поверхностного нагрева втулки вихревыми токами и ее последующего охлаждения возникают дополнительные сжимающие напряжения, которые улучшают качество соединения при выполнении сборочных операций.

Освоение технологии магнитно-импульсной сборки соединений многопроволочных проводов требует исследования особенностей процесса и определения его оптимальных параметров.

Моделирование процесса магнитно-импульсной сборки соединения. Задача численного моделирования — исследование характерных особенностей процесса деформирования системы "провод—втулка" при различных параметрах нагрузки импульсного магнитного поля и определение рациональных режимов получения соединения проводов.

Для изучения основных закономерностей процесса получения соединения давлением импульсного магнитного поля использовали многопроволочные провода: монометалличеТаблииа 1

ские медный провод М-120 и алюминиевый А-185, биметаллический сталемедный провод ПБСМ-95 и комбинированный сталеалюминевый провод АС-50/8 (табл. 1).

Параметры многопроволочных проводов

Марка провода	Площадь сечения, мм ²	Число проволок в проводе	Диаметр провода, мм
M-120	120	19	14,0
A-185	185	19	17,5
ПБСМ-95	95	19	12,5
AC-50/8	50/8	6/1	9,6

Численное моделирование процессов сборки соединений проводов проводили в Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН и Новосибирском государственном техническом университете. Использовали программный пакет CRUG24 для расчета ударных взаимодействий. Решали данную задачу численно методом конечных разностей. Исследовали кинематику и механизм образования соединения проводов прессованием (обжимом) алюминиевых и медных втулок на многопроволочный провод давлением импульсного магнитного поля. Материал соединительных втулок — медь М1 и алюминий А0.

Для каждого элемента разработанной расчетной модели задавали свои физико-механические свойства. Это позволило моделировать процесс сборки соединения как из однородных, так и из разнородных материалов. При численном моделировании процесса сборки соединения сталемедных проводов ПБСМ-95 внутри каждой проволоки выделяли сеточные области стального сердечника и ее медной оболочки. При численном моделировании процесса магнитно-импульсной сборки соединения сталеалюминевых проводов АС-50/8, задавали различные характеристики материала центральной стальной жилы провода и его внешних алюминиевых проволок. Исследовали особенности образования соединения медь—медь: провод М-120, ПБСМ-95 и медная соединительная втулка; соединения алюминий—алюминий: провод А-185, АС-50/8 и алюминиевая соединительная втулка; переходных соединений медь—алюминий: провод М-120 и алюминиевая втулка, провод А-185 и медная втулка.

Варьируемыми параметрами при численном моделировании процессов сборки каждого вида соединения были энергия заряда магнитно-импульсной установки Wи толщина стенки соединительной втулки S. При моделировании процесса сборки соединения проводов в расчетах использовали параметры магнитно-импульсной установки МИУ-30, на которой затем проводили натурные эксперименты: собственная индуктивность установки L = 0,004 мкГн, емкость конденсаторных батарей C = 168 мкФ, максимальное напряжение заряда конденсаторов U = 19 кВ, максимальная энергия заряда W = 30,3 кДж.

Удельную энергию W_{yg} на сборку соединения проводов определяли как отношение энергии заряда МИУ к объему деформированного материала в соединении, Дж/мм³,

$$W_{\rm yg} = W/(F \cdot l),$$

где *F* — суммарная площадь поперечного сечения втулки и провода в соединении;

l — ширина рабочей зоны индуктора, определяющая длину зоны обжима в полученном соединении.

Одна из основных характеристик качества прессового соединения, каким является соединение проводов, полученное давлением импульсного магнитного поля, — разрушающая сила при испытании полученного соединения на разрыв. Она во многом определяет его эксплуатационные параметры. При проведении численного моделирования процессов магнитно-импульсной сборки в качестве критерия оптимизации выбран коэффициент заполнения сечения K_{3an} , косвенно определяющий механическую прочность соединения:



Рис. 1. Изменение скорости деформирования соединительной втулки (М1, S = 2,5 мм) при обжиме многопроволочного провода ПБСМ-95

$$K_{_{3}a_{\Pi}} = 4F/\pi d^2, \qquad (3.1)$$

где *d* — наружный диаметр соединения (втулки) после сборки соединения проводов.

На основании результатов, полученных в процессе численного моделирования, определены зависимости скорости перемещения внутренней стенки трубчатой соединительной втулки в процессе ее деформирования давлением импульсного магнитного поля и последующего обжима провода в функции удельной энергии заряда МИУ.

Анализ полученных зависимостей (рис. 1) показал, что для всех выбранных типоразмеров соединительных втулок и проводов в момент времени т = 2,5...3,5 мкс от начала разряда магнитно-импульсной установки и нарастания давления импульсного магнитного поля начинается радиальное деформирование соединительной втулки. На 10...12 мкс начинается процесс контакта внутренней поверхности втулки со всеми внешними проволоками провода. Сначала начинают деформироваться проволоки внешнего повива провода, а затем деформируются средний повив провода и центральная проволока. При полном обжиме провода после 19...24 мкс действия давления импульсного магнитного поля все проволоки пластически деформированы. Коэффициент заполнения сечения в полученном соединении достигает макси-



Рис. 2. Изменение коэффициента заполнения сечения при соединении многопроволочных проводов ПБСМ-95 давлением импульсного магнитного поля (соединительная втулка М1, S = 2,5 мм)

мума, и соединительная втулка тормозится (рис. 2).

При недостаточной удельной энергии не происходит полного компактирования проволок в соединении ($K_{3an} < 1$) и не обеспечивается нужное качество соединения. При рациональном режиме магнитно-импульсного воздействия деформация проволок и окончательное обжатие всего провода происходят на этапе максимального разгона, что обеспечивает смыкание всех проволок и заполнение всего поперечного сечения соединения. Это достигается, если максимум давления импульсного магнитного поля совпадает с максимумом скорости деформирования соединительной втулки.

При избытке удельной энергии заряда магнитно-импульсной установки полное обжатие провода соединительной втулкой давлением импульсного магнитного поля происходит за 15...17 мкс, хотя давление продолжает нарастать. Максимум скорости деформирования соединительной втулки не совпадает с максимумом давления импульсного магнитного поля. Перерасход энергии заряда магнитноимпульсной установки и нерациональное силовое воздействие на полученное соединение не повышает его качество.

Критерием эффективности процесса сборки выбран минимум энергии заряда магнитноимпульсной установки, необходимый для достижения полного компактирования прово-



Рис. 3. Зависимость минимальной удельной энергии сборки соединения проводов от толщины соединительной втулки:

1 – АС 50/8; *2* – ПБСМ-95; *3* – М-120; *4* – А-185

лок провода в соединении ($K_{3an} \approx 1$). Обработкой результатов расчета получены зависимости минимальной расчетной удельной энергии заряда МИУ, при которых достигается $K_{3an} \approx 1$, при использовании втулок с различной толщиной стенки, имеющих прочность на разрыв не ниже прочности провода (рис. 3). Взаимодействие втулки с монометаллическими проволоками проводов М-120 и А-185 приводит к равномерному деформированию большей части проволок. При сборке соединений проводов ПБСМ-95 с биметаллическими проволоками провода наблюдается деформирование медной оболочки проволок в значительно большей степени, чем их стальной сердцевины (рис. 4). У сталеалюминевого провода АС-50/8 центральная стальная проволока также деформируется мало.

Экспериментальные исследования. При магнитно-импульсной сборке геометрия и параметры соединений многопроволочных проводов определяются как исходными размерами соединительной втулки, так и пространственно-временными характеристиками импульсных магнитных полей в процессе образования соединения. Рабочим инструментом, определяющим эпюру давления при магнитноимпульсной сборке, является индуктор. В экспериментах использовали индукторы с концентраторами магнитного поля с рабочим отверстием под втулки диаметром 16...28 мм,



Рис. 4. Деформирование биметаллических проволок (провод ПБСМ-95) и соединительной втулки (М1) при магнитноимпульсной сборке:

а — численное моделирование; *б* — эксперимент



что позволило охватить весь типоразмер выбранных многопроволочных проводов. Ширина рабочей зоны концентратора варьировалась от 6 до 15 мм. Это позволило изменять зону действия давления импульсного магнитного поля, геометрию формуемых рифтов, а также дополнительно варьировать величину удельной энергии заряда. Эксперименты проводили в НИИ-204 Самарского государственного аэрокосмического университета на магнитно-импульсных установках МИУ-20 и МИУ-30.

Металлографические исследования полученных соединений многопроволочных проводов подтвердили результаты численного моделирования, что при магнитно-импульсной сборке значительно деформируется внутренняя поверхность соединительной втулки. При малой толщине стенки соединительной втулки наблюдается прорисовка рельефа проволок и на ее наружной поверхности.

Разрезы многопроволочного провода и соединительной втулки после сборки соединения на оптимальных значениях энергии заряда МИУ показали, что происходит полное компактирование проволок провода и их огранка. Имеет место контакт проволок провода практически по всей их поверхности. Оксиды и грязь вытесняются в малые локальные зоны между проволоками (рис. 5). Состояние границ между отдельными проволоками, а также между проволоками и втулкой в соединении зависит главным образом от удельной энергии заряда МИУ и начального зазора между внешним слоем проволок и внутренней поверхностью соединительной втулки, определяющих скорость соударения втулки с проводом.

При получении переходных соединений медь—алюминий выявлены принципиальные различия сборки соединения медного провода М-120 с алюминиевой втулкой и алюминиевого провода А-185 с медной втулкой. В первом случае площадь контакта втулки с внешним слоем проволок увеличивается на 30...40 % по сравнению с соединением провода А-185 и медной втулки за счет "затекания" материала мягкой алюминиевой втулки между медными проволоками вследствие эффекта высокоскоростного соударения (рис. 6, *a*). Во втором случае более прочная медная втулка сильно сминает алюминиевые проволоки (рис. 6, *б*).

У биметаллических проволок провода ПБСМ-95 наблюдается небольшая деформация стального сердечника, а медная оболочка проволок существенно деформируется. За счет этого наблюдается достаточно сильное затекание материала медной втулки в полости между проволоками, что дополнительно увеличивает



Рис. 5. Вид границ контакта проволок многопроволочного провода в соединении, ×50: *а* — провод М-120; *б* — провод А-185



Рис. 6. Вид поверхности контакта втулки и проволок в соединении, ×50: *а* — провод М-120 и втулка А0; *б* — провод А-185 и втулка М1

площадь контакта втулки и провода в соединении.

Испытания полученных соединений проводили на разрывных машинах P-5 и P-50 с использованием цилиндрических захватов для проводов. На механические характеристики соединений многопроволочных проводов, выполненных на оптимальных режимах, существенное влияние оказывают геометрические размеры соединительных элементов. Равнопрочность этих соединений целому проводу достигается при длине втулки 120 мм для M-120 и 150 мм для A-185 и ПБСМ-95. Толщину соединительной втулки для соединения рассчитывали из условия ее равнопрочности соединяемым проводам.

Тепловые и электрические испытания соединений. Проверку качества электрического контакта соединений многопроволочных проводов, полученных давлением импульсного магнитного поля, проводили в соответствии с ГОСТ 10434—82, ГОСТ 17441—84 и ГОСТ 12393—2013 с использованием теплового стенда на кафедре "Электроснабжение железнодорожного транспорта" Самарского государственного университета путей сообщения.

Качество полученных соединительных узлов определяли коэффициентами дефектности электрического контакта по электрическому сопротивлению — *K*_R и по перегреву условным номинальным током — K_{Θ} . Условный номинальный ток для определения K_{Θ} 400...600 А поддерживали в процессе испытания неизменным с погрешностью не более 3 % (контролировали мультиметром Masteh MY-62). Измерение температуры перегрева соединения (середина соединительной втулки) и провода (на расстоянии 1 м от втулки) проводили с использованием термопар и цифрового мультиметра АРРА 109 (класс 0,1). Падение напряжения на проводе и в соединении измеряли при каждом выбранном значении тока цифровым мультиметром Masteh M890G (класс 0,1).

Коэффициенты дефектности соединений по нагреву и по электрическому сопротивлению определены для соединений проводов М-120 и ПБСМ-95 с медными втулками; соединений проводов А-185 с алюминиевыми втулками. Для переходных соединений проводов М-120 и А-185 использовали алюминиевые и медные втулки.

Установлено, что температура перегрева полученных соединений существенно ниже температуры перегрева самих проводов вне соединения. Коэффициенты дефектности соединений по сопротивлению составляют 0,56...0,74, а коэффициенты дефектности по перегреву — 0,66...0,88, что ниже значений установленных для соединений, выполненных методом опрессовки [3].



Выводы

На базе численного моделирования и натурных экспериментов исследован механизм образования соединения многопроволочного провода и втулки при магнитно-импульсной сборке. Это позволило рассчитать параметры процесса, обеспечивающие близкое к 100 % заполнение внутреннего сечения в соединениях многопроволочных проводов, создающее максимальную прочность сборки.

Установлены особенности совместного деформирования втулки и провода при получении соединений многопроволочных монометаллических, биметаллических и комбинированных проводов давлением импульсного магнитного поля, в том числе для переходных соединений медь—алюминий. Получены зависимости для определения минимальной удельной энергии заряда магнитно-импульсной установки, позволяющей обеспечить необходимые прочностные и электрические характеристики соединений при сборке соединений различных видов многопроволочных проводов.

При магнитно-импульсной сборке соединений, вследствие высокой скорости деформации и действия больших инерционных сил, происходит локализация деформаций в зоне действия давления импульсного магнитного поля. Поэтому, в отличие от прессования зажимов проводов гидравлическими прессами, при магнитно-импульсном методе практически не происходит ослабление сечения провода, что особенно актуально при сборке соединений многопроволочных алюминиевых проводов.

Библиографический список

1. Самохвалова Ж.В., Григорьев В.Л., Самохвалов В.Н. Сборка стыковых соединений проводов контактной подвески давлением импульсного магнитного поля // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 8. С. 4—11.

2. **Численное** моделирование процесса сборки наконечников с электрожгутами давлением импульсного магнитного поля / Н.В. Курлаев и др. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2001. № 8. С. 38–42.

3. Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В., Целиковская В.С. Магнитно-импульсный метод получения прессуемых зажимов многопроволочных проводов контактной сети // Вестник научно-исследовательского института железнодорожного транспорта. 2012. № 3. С. 53—57.





ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 621.336.322

В.Я. Берент, ∂-р техн. наук (ВНИИЖТ) E-mail: val.berent@yandex.ru

Процессы, протекающие на поверхностях трения медного контакта с порошковым на железной основе

Исследован материал для токосъемных элементов полозов токоприемников электроподвижного состава со свойствами самосмазывания — контакт каркасного типа на основе железа с необходимой пористостью для ввода в композит твердой смазки пропиткой. Применение порошковых токосъемных элементов на полозах токоприемников позволило снизить износы контактного провода и увеличить пробеги полозов.

Material for contact strip of the pantograph head is being developed for electric vehicles. Powder materials are used to produce a frame type iron based contact which has a proper porosity level to be able to absorb solid lubricant by impregnation. Using powder material for contact strips of the pantograph head enables to decrease wear of the contact wire and increase the life of pantograph head.

Ключевые слова: сильноточный скользящий контакт, износ, схватывание, момент трения, контактный провод, токосъемный элемент полоза, порошковый материал, твердая смазка, вторичные структуры.

Keywords: high current sliding contact, wear, seizure, friction moment, contact wire, contact strips of pantograph head, powder material, solid lubricant, secondary structures.

В России среди железных дорог первостепенное место занимают электрифицированные.

Обеспечение надежной работы электрифицированных дорог требует постоянного совершенствования сильноточного скользящего контакта — контактного провода цепной подвески — токосъемных элементов полозов токоприемников подвижного состава.

Материал токосъемных элементов должен снимать с контактного провода на электроподвижной состав (ЭПС) необходимый по величине ток, обеспечивать большие пробеги полозов токоприемников при предельном износе, подвергать малому износу контактный провод.

Токосъем на электрифицированных железных дорогах осуществляется в весьма неблагоприятных условиях. Сильноточный скользящий контакт — токосъемные элементы полозов токоприемников ЭПС — контактный провод цепной подвески контактной сети находятся в окружающей среде под воздействием низких и высоких температур, дождя и снега.

При работе трибосистемы скользящего контакта в таких неблагоприятных условиях и прохождении электрического тока контактные поверхности повреждаются. С целью снижения отрицательных воздействий на контакты для токосъемных элементов полозов применяют материалы со свойствами самосмазывания при обеспечении симметричности контактов, т.е. выбрают материалы контактов с одинаковой теплопроводностью и электропроводностью.

Использование различных металлов (низкоуглеродистой стали, графитизированной стали, алюминиевых сплавов, меди и ее сплавов) для токосъема на полозах токоприемников ЭПС, несмотря на нанесение на полоз жирной и сухой графитовых смазок, вызывает высокие износы контактного провода. Эти материалы имеют весьма низкие антифрикционные свойства, интенсивно изнашиваются и изнаши-



вают провод. Ежегодно демонтируют до 1000 т медных контактных проводов.

Для пластичных металлов при сухом трении под нагрузкой характерно проявление схватывания, которое является основной причиной износа трущихся тел. А.П. Семенов [1] считает, что в обычных условиях металлы и сплавы не могут использоваться в трибосистемах, работающих при высоких температурах, вызванных фрикционным нагревом и прохождением электрического тока. В этом случае необходимо использовать композиционные материалы, имеющие в своем составе твердые смазки. Для удовлетворения противоречивых требований, предъявляемых к материалу токосъемного элемента, компоненты, составляющие его, должны сохранять индивидуальные свойства и соединены друг с другом так, чтобы использовать все их положительные характеристики. В композите компоненты должны слабо взаимодействовать как в жидком, так и твердом состоянии [2].

Использование технологии порошковой металлургии позволяет создать композиты, сочетающие необходимые свойства для токосъемных элементов со свойствами самосмазывания. Для лучшего теплоотвода при снижении тепловой энергии, выделяющейся в контакте, композит выполняют на металлической основе. Необходимо обеспечить симметричность контакта (практически одинаковые у обоих контактов теплопроводность и удельное электрическое сопротивление).

С целью удешевления токосъемных элементов создан материал каркасного типа на железной основе. Железо обладает высокими теплофизическими характеристиками ($T_{плав}$, $T_{кип}$), препятствующими переносу металла в дуге. Оно удовлетворительно работает в режиме сухого трения с медью [3, 4], широко применяется в порошковых подшипниках скольжения [5]. Недостатком железа является его высокая окисляемость на воздухе. По мнению Р. Хольма [6] оно может обеспечить необходимые для электрических контактов свойства.

Путем легирования порошкового железа медью в нем создается наибольшая пористость для достижения наиболее высоких свойств самосмазывания вводом пропиткой большего количества твердой смазки. При недостаточных количествах твердой смазки поверхностные слои медного контакта интенсивно нагортовываются. Периодическое изменение величин момента трения связано с изменениями состояния поверхностей трения порошкового и медного контактов. В результате переноса за счет микросхватывания железных частиц и твердой смазки с порошкового контакта на медный и насыщения железных частиц твердой смазкой происходит уменьшение момента трения и износов обеих пар трения. Ввод в порошковое железо Р и S позволяет стабилизировать момент трения и снизить износы пар трения.

Токосъемный элемент каркасного типа на железной основе с вводом в него твердой смазки в виде легкоплавкого сплава на основе свинца с 5 % олова создавали пропиткой порошкового материала с достаточно высокой открытой пористостью. На основе диаграммы состояния Fe-Cu с учетом их взаимной растворимости определяли пористость порошкового железа в зависимости от содержания в нем меди. Корпуса токосъемных элементов из порошкового железа с содержанием 5, 10, 15 и 20 % Си изготовили по технологии прокатки порошков на Выксунском металлургическом заводе. Спекали порошковые материалы контактных пластин в восстановительной атмосфере водорода при 1150 °С в течение 3 ч. Пропитку проводили в автоклаве с предварительным нагревом пластин до температуры 450...500 °С. При погружении их в расплав легкоплавкого сплава в автоклаве создавали вакуум для удаления воздуха из пор порошкового материала, подачей воздуха компрессором повышали давление на расплав до 980·10⁴ H/м².

Установлено, что при вводе в порошковое железо 8...10 % меди в нем образуется наибольшая пористость (22,5 %), а при 20 % Си наименьшая (12 %). При этом в результате пропитки в первом случае в материал вводили более 23 % легкоплавкого сплава, а во втором случае — 2,7...8,6 %. Такое соотношение твердой смазки в порошковых материалах повлияло на их антифрикционные свойства.

Износные испытания проводили в режиме сухого трения на машине МИ по схеме "колодка—ролик" при тщательном обезжиривании образцов. Ролик имитировал контактный провод. Медь ролика деформировалась так же, как и медь провода. Нормальная нагрузка при испытаниях составляла 0,7 МПа при скорости скольжения 0,41 м/с. Износ определяли по разности массы обоих образцов с точностью 0,0001 г. Ошибка опыта при испытании на машине МИ составляла 0,007 г (рис. 1).

Количество и распределение твердой смазки на поверхности трения медного контакта оценивали микроанализатором растрового микроскопа JEOL JXA-50A (рис. 2).

Проведены исследования шероховатости поверхностей трения медных контактов, работающих с порошковыми материалами при различном содержании в них твердой смазки (табл. 1). Высокое содержание твердой смазки в порошковом материале уменьшает повреждаемость контртела.

В скользящем контакте происходит пластическая деформация поверхностных слоев металла под воздействием нормальных и тангенциальных сил. У медного контакта в зависимости от интенсивности протекания процесса реализуется тот или иной характер распределения структурных изменений по глубине приповерхностного слоя. На нагартовку и разупрочнение металла при фрикци-







Рис. 2. Содержание твердой смазки на поверхности медного контакта при взаимодействии с пропитанным твердой смазкой порошковым железом с 10 % Cu (*a*) и 15 % Cu (б)

онном нагреве в значительной степени оказывает влияние прочность и твердость железного каркаса порошкового материала и наличие на поверхности защитного слоя смазки. Влия-

Таблица 1

Шероховатость поверхностей трения медных контактов при различном содержании в них твердой смазки

Параметр	Массовая доля смазки, %		
	27,7	15,816,5	
Среднее арифметическое отклонение профиля <i>Ra</i> , мкм	2,3	7,8	
Наибольшая высота неровно- стей профиля Rmax, мкм	15,5	42,3	
Средний шаг неровностей профиля <i>Sm</i> , мм	150	193	

ние количества твердой смазки, присутствующей в порошковом материале, проявляется в структурных изменениях медного контакта. При малом количестве твердой смазки поверхностные слои медного контакта интенсивно нагартовываются (рис. 3), создавая отрицательный градиент механических свойств по И.В. Крагельскому [7]. Съемку медного контакта проводили на дифрактометре ДРОН-2,0 в $K_{\rm Co}$ -излучении при послойном стравливании металла с поверхности трения.

В приработочный период трения износы обоих образцов скользящего контакта с массовой долей 12...15 % в порошковом материале твердой смазки достаточно большие (медного контакта — 0,08 г, порошкового материала — 0,1 г на пути 2,5 км). При увеличении массовой доли твердой смазки до 23...25 % износы контактов в приработочный период соответственно уменьшаются (0,023 и 0,038 г) и остаются такими же при установившемся периоде трения.

Определенные закономерности в поведении скользящего контакта выявлены при проведении испытаний на электрофрикционную теплостойкость с использованием машины трения МТТЭ-1. Порошковые материалы испы-

 $\beta \cdot 10^{3}$, рад



тывали при разных скоростях в режиме сухого трения, нагрузке 0,2 МПа в паре с медным контртелом, имитирующим контактный провод. Через контакт пропускали постоянный ток 75 А. Методика проведения испытаний предусматривала взаимодействие контактов в течение 30 мин при каждой скорости (рис. 4). При низких скоростях скольжения, а следовательно и малых нагревов поверхностей трения, порошковые материалы без твердых смазок интенсивно изнашивают медный контакт и сами подвергаются интенсивному износу. В случае высоких скоростей скольжения даже при отсутствии твердых смазок износ обоих контактов резко снижается за счет проявления окислительного износа из-за их нагрева. При наличии в них твердой смазки этот процесс также наблюдается, но при малых скоростях износ контактов низкий благодаря защитному лействию смазки.

Изменение химического состава вторичных структур на поверхностях трения медного и порошкового материала на железной основе и их продуктов износа при увеличивающихся скоростях скольжения и их фрикционного нагрева определяли рентгенографическими исследованиями. Анализируя интенсивность



Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания от температуры скользящего контакта при различных скоростях скольжения и постоянной плотности тока 25 А/см²: 1, 1' — порошковый материал без пропитки твердой смазкой и с пропиткой; 2, 2' — медный контакт при взаимодействии с непропитанным и пропитанным порошковым железом



Рис. 5. Распределение на рентгенограммах интенсивностей дифракционных линий вторичных структур медного контакта (I = 50 A; $P = 2 \text{ кгс/см}^2(20 \cdot 10^4 \text{ Па})$): $a - \text{скорость скольжения 0,625 м/с, } t = 1 \text{ ч; } \delta - \text{скорость}$ скольжения 1,875 м/с, t = 5 ч

и появление новых дифракционных линий на рентгенограммах установили, что в процессе трения при нагрузке 2 кгс/см² ($20 \cdot 10^4$ Па), токе 50 А, скорости 0,625 м/с на медном контакте после часа работы во вторичных структурах содержится Сu, Fe, CuO, небольшое количество Cu₂O (рис. 5, *a*). В случае увеличения скорости скольжения в 3 раза до 1,875 м/с и времени работы до 5 ч во вторичных структурах дополнительно появляются Fe₂O₃, Cu₂O, Pb (рис. 5, *б*). При тех же условиях взаимодействия на порошковом контакте в состав вторичных структур входят Fe, Fe₂O₃, Cu, Cu₂O, Pb (рис. 6, *a*), а в случае увеличения скорости скольжения — Fe, Cu, Cu₂O, Fe₂O₃, Pb (рис. 6, *б*).

Увеличение в составе вторичных структур количества оксидов по мере повышения ско-



Рис. 6. Распределение на рентгенограммах интенсивностей дифракционных линий вторичных структур порошкового контакта на железной основе:

а — скорость 0,625 м/с; *б* — скорость 1,875 м/с

рости скольжения и фрикционного нагрева подтверждено рентгенографическими исследованиями продуктов износа (табл. 2).

Для повышения дугостойкости порошкового материала в его состав вводили тугоплавкие частицы стали X18H15 (не более 10 % из-за абразивного воздействия на медный контакт).

Пропитка порошкового материала на основе железа водными растворами ультрафосфата марганца или водными растворами алюмохромофосфата снижает износы трущихся тел и коэффициент трения за счет устранения появления ювенильных поверхностей в результате образования защитных пленок фосфатов [8, 9]. В порошковый материал токосъемных элементов вводили не более 0,5 % фосфора, так как при большем его содержа-

Таблица 2

Фазовый состав продуктов износа трибосистемы медный контакт — порошковый материал на железной основе

Температура, °С	Порошковый материал			
	Без пропитки	С пропиткой твердой смазкой		
4050	α-Fe, Cu	α-Fe, Cu, Pb, Sn (следы)		
6070	α-Fe, Cu	α-Fe, Cu, Pb, Sn (следы)		
7585	α-Fe, Cu	α-Fe, Cu, Pb		
90105	α-Fe, Cu, Cu ₂ O	α-Fe, Cu, Pb (следы)		
110130	α -Fe, Cu, Cu ₂ O, Fe ₂ O ₄	α-Fe, Cu, Pb (следы)		
140150	α -Fe, Cu, Fe ₃ O ₄ , Fe ₂ O ₃	α -Fe, Cu, Fe ₃ O ₄ , Pb		
160180	α -Fe, Cu, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄	α-Fe, Cu, Fe ₃ O ₄ , Pb (следы)		
230250	α -Fe, Cu, Fe ₂ O ₃ , Fe ₃ O ₄	α -Fe, Cu, Fe ₂ O ₃ , Pb, PbO		



нии образуются крупные частицы фосфидов железа, действующие на медный контакт, как абразив. Ввод в порошковый материал фосфора в установленных пределах уменьшил износы обоих контактов в 1,4 раза.

При проведении износных испытаний порошкового материала токосъемных элементов на машине трения МИ установили, что момент трения не постоянен и меняется со строгой периодичностью. Амплитуда колебания момента трения при нагрузке 0,7 МПа мала, а при нагрузке 1,4 МПа она наиболее выражена. Минимальные значения момента трения находятся всегда на одном уровне, а максимальные подвержены незначительным колебаниям. В течение 1,5 ч при прохождении 2,5 км наблюдается появление трех максимальных моментов и трех минимальных. Постоянные, периодические изменения момента трения наблюдали при длительных испытаниях (17,5 км и более). От прекращения испытаний на сутки и более характер изменений момента трения не менялся. Если эксперимент прерывали на подъеме момента трения, то спустя 5 ч после возобновления испытаний он продолжал подниматься до своего предельного значения. Износы пар трения наибольшие в период работы при максимальном моменте трения и наименьшие в период минимальных моментов (для медного контакта различие составило 2,5-3 раза, а для порошкового материала — 2—2,5 раза). Все наблюдаемые явления указывают на то,

что в процессе трения состояние поверхностей трения периодически видоизменяется. Металлографическим анализом на растровом электронном микроскопе JEOL JXA-50A состояния поверхностей трения обоих контактов установлено, что при максимальных значениях момента трения на поверхности трения порошкового материала располагается небольшое число включений твердой смазки. Состояние поверхности порошкового материала при этом отличается большими неровностями, чем при минимальном моменте трения (рис. 7). В период максимального момента трения из-за малого количества твердой смазки в результате микросхватывания происходит перенос частиц железа порошкового материала на медный контакт. Из-за неровностей в виде железных частиц на поверхности медного контакта твердая смазка вытесняется на поверхность порошкового материала, в результате чего на поверхности медного контакта появляются компактные объемы твердой смазки (рис. 8). Недостаточное количество смазки на поверхности трения порошкового материала и ее компактное распределение на медном контакте с прохождением микросхватывания вызывают повышение момента трения.

По мере деформации, размазывания компактных частиц смазки на медном контакте (рис. 9), обогащения железных частиц на поверхности медного контакта твердой смазкой, износа поверхности порошкового материала с заменой слоя с обедненным количеством смазки на более



Рис. 7. Плотность заполняемости пор твердой смазкой на поверхности трения порошкового материала при максимальном моменте трения (*a*) и рельефная съемка в $K_{\rm Pb}$ -излучении (*b*); при минимальном моменте трения (*b*) и рельефная съемка в $K_{\rm Pb}$ -излучении (*c*), ×500



Рис. 8. Состояние твердой смазки на поверхности медного контакта, перенесенного с порошкового материала, ×500: a — во вторичных электронах; б — в $K_{\rm Pb}$ -излучении

богатый происходит уменьшение момента трения. При минимальном моменте трения поверхность порошкового материала наиболее гладкая с большим числом заполненных включений твердой смазки, а железные участки на поверхности медного контакта наиболее обогащены твердой смазкой (рис. 10). Колебания момента трения устранили введением в состав порошкового материала серы или сульфида цинка. В этом случае по мере продолжительности работы поверхность трения порошкового материала оставалась гладкой с постоянным средним числом включений твердой смазки. При этом износ обоих контактов снизился в 1,2 раза.

Использование разработанных порошковых токосъемных элементов полозов токоприемников вместо монолитных медных контактных пластин снизило износ медного контактного провода на электрифицированных дорогах постоянного тока в 2—2,5 раза, повысило пробеги полозов при износе токосъемных элементов в 2—3 раза.

Электроконтактные характеристики порошковых контактных пластин из-за низкого теплового воздействия на медный контактный провод позволяют при токосъеме с провода снимать в движении ток 2600 А. Это дает возможность их применять на мощных грузовых и пассажирских электровозах [10].



Рис. 9. Деформация, размазывание твердой смазки железными частицами по поверхности медного контакта: *a* — композиционная съемка, ×350; *б* — *K*_{Fe}-излучение; *в* — *K*_{Pb}-излучение, ×1000



Рис. 10. Насыщение более темных железных частиц твердой смазкой на поверхности трения медного контакта при минимальном моменте трения (в более темных участках железных частиц содержится в 2—5 раз больше твердой смазки, чем в светлых), ×300:

a — во вторичных электронах; δ — в $K_{\rm Pb}$ -излучении; e — в $K_{\rm Fe}$ -излучении

Выводы

1. Для токосъемных элементов полозов токоприемников ЭПС постоянного тока требуется использовать порошковые материалы на металлической основе со свойствами самосмазывания.

2. Отсутствие в составе порошковых материалов необходимого количества твердой смазки, позволяющего снизить износ контактов в трибосистеме, приводит к образованию отрицательного градиента механических свойств в поверхностных слоях контртела.

3. Уменьшение износа пар трения под действием твердой смазки проявляется при невысоких скоростях скольжения, когда из-за низких температур нет окислительного износа.

4. Ввод в состав порошкового материала на железной основе химически активных металлоидов (серы и фосфора) уменьшает износ пар трения за счет снижения образования ювинильных поверхностей.

5. Периодичность изменения момента трения и износа пар трения вызвана изменением состояния их поверхностей трения.

6. Понижение момента трения и уменьшение износа скользящего контакта вызваны переносом железных частиц и твердой смазки с порошкового контакта на медный и насыщением железных частиц на нем твердой смазкой.

7. Применение для токосъема порошкового материала снижает износ контактного провода и увеличивает срок службы токосъемных элементов.

Библиографический список

1. Семенов А.П. Трибологические свойства металлов, металлоподобных соединений и композиционных материалов при высоких температурах // Трение и износ. № 4. Т. 22. 2007. С. 426—435.

2. **Теодорович О.К., Дьеченко И.М., Кацалуха С.А.** Композиционные электроконтактные материалы и экономическая эффективность их применения. Киев: УкрНИиТИ, 1973. 85 с.

3. Берент В.Я. Материалы и свойства электрических контактов в устройствах железнодорожного транспорта. М.: ИНТЕКСТ, 2005. 408 с.



4. **Берент В.Я.** Исследование сварки металлов и процессы, вызывающие схватывание при трении скольжения // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 14—23.

5. **Федорченко И.М., Пугина Л.И.** Композиционные спеченные антифрикционные материалы. Киев: Наукова думка. 1980. 403 с.

6. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Иностранная литература. 1961. 464 с.

7. Крагельский И.В. Трение и износ. М.: Машиностроение, 1968. 497 с.

8. Васильев Ю.Н., Швецова Г.А., Берент В.Я., Буше Н.А. Антифрикционные свойства материала на основе железа, содержащего ультрафосфат марганца. Порошковая металлургия. Киев: Наукова думка. 1982. № 7. С. 91—94.

9. Васильев Ю.Н., Швецова Г.А., Берент В.Я., Лавров А.В. Исследование антифрикционных свойств спеченного железного материала, пропитанного алюмохромфосфатами // Трение и износ. 1985. Т. 6. № 7. С. 368—372.

10. Берент В.Я. Токосъемные элементы полозов токоприемников // Железнодорожный транспорт. 2015. № 7. С. 60—65.



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*

Контактные взаимодействия элементов срезного болтового соединения в условиях фреттинг-изнашивания

Исследовано контактное взаимодействие элементов срезного болтового соединения с радиальным натягом при наличии фреттинг-износа в зоне контакта. Предлагается метод экспериментального определения эффективного коэффициента фреттинга (ЭКФ) по потере герметичности соединения при циклическом нагружении. Получены зависимости ЭКФ от номинального натяга, необходимые для расчета соединений на сопротивление усталости с учетом воздействия фреттинга.

Investigated the contact interaction of elements of shear bolted connection with a radial interference fit in the presence of fretting wear in the contact zone. We propose a method for experimental determination of effective coefficient of fretting (ECF) for the loss of tightness of the connection under cyclic loading. The dependencies are obtained from the ECF nominal preload required for calculation of joints resistance to fatigue taking into account the effects 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.

Проблема предотвращения или минимизация фреттинг-износа элементов конструкции планера самолета актуальна и важна с точки зрения обеспечения требуемого ресурса.

Действие контактного давления, обусловленного радиальным натягом, на долговечность болтовых соединений, проявляется двояко [1]. С одной стороны оно увеличивает долговечность соединения вследствие снижения силовых взаимодействий между контактными поверхностями, а с другой — уменьшает вследствие фреттинг-износа этих поверхностей.

Рассмотрим кинетику развития изнашивания контактирующих поверхностей (стержень болта — стенка отверстия) и соответствующих контактных давлений в соединении с натягом с использованием графического способа. Законы изнашивания определяются соотношением между скоростью изнашивания γ , давлением на поверхности трения p и скоростью относительного скольжения v [2]:

$$\gamma = K_{\mu} p^m \mathbf{v}^n, \tag{1}$$

где m = 0, 5....3;

 $n \approx 1$ для большинства пар трения;

*К*_и — коэффициент износа.

Линейный износ $U = \gamma t = K_{\mu} p^m v^n t$, где t — толщина пластины.

Контактные давления p от совместного действия натяга p_0 и внешней нагрузки P определяют по эмпирической формуле [3]:

$$p = p_0 + \frac{3 + \mu_1}{2\pi} \frac{P \cos \alpha}{dt}; \qquad (2)$$
$$= \frac{\Delta}{d} \left[\frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1}{E_2} \left(\frac{1 + a^2}{1 - a^2} + \mu_2 \right) \right]^{-1},$$

где Δ — радиальный натяг;

 E_1 , μ_1 и E_2 , μ_2 — модули упругости и коэффициенты Пуассона материала болта и пластины; a = d/D;

d — диаметр стержня болта;

D — условный диаметр, равный ширине пластины.

Под нагрузкой в рассматриваемом поперечном сечении на сжатом слое ($\alpha = 0$) контактное давление возрастает, а на растянутом слое ($\alpha = 180^{\circ}$) — уменьшается. При определенных







Рис. 2. Графики изменения σ/E в зависимости от величины натяга Δ при нагрузках, соответствующих началу проскальзывания при разных значениях коэффициентов трения:

1 - 0,54; 2 - 0,27; 3 - 0,135

условиях, когда касательные силы превышают силы трения $\tau_{c\kappa} > fp$, на некоторой дуге контакта происходит проскальзывание и, как следствие, изнашивание контактирующих поверхностей.

По результатам расчета методом конечных элементов соединения с натягом 0,5 % приведены графики изменения по контуру соединения с натягом величины относительного смещения U_t/d точек пластины и штифта в кольцевом направлении, характеризующего проскальзывание при нагрузках $\sigma/E = 0,5$; 0,75 и 1, где E — модуль упругости материала пластины (рис. 1).

В расчете учитывали влияние сил трения по поверхности контакта штифта с пластиной [4]. Перемещение возникает на контуре при угле $\varphi = 140^{\circ}$ независимо от величины внешней на-грузки.

На рис. 2 приведены графики изменения σ/E в зависимости от величины натяга Δ нагрузок, соответствующих началу проскальзывания между болтом и пластиной при разных значениях коэффициента трения. Нагрузка начала проскальзывания увеличивается пропорционально натягу. Учет трения приводит к значительному увеличению



Рис. 3. Диаграмма изменения контактных давлений (*a*) и фактических натягов (б) при фреттинг-изнашивании элементов соединения

нагрузки начала проскальзывания. Таким образом, для повышения величины нагрузки целесообразно повышать трение между болтом и соединяемыми деталями. Однако увеличение коэффициента трения приводит к повышению посадочного усилия и затрудняет сборку при высоких натягах. Поэтому эффект трения следует использовать в тонких пакетах.

Непосредственно расчет локального износа обычно не делается в силу его сложности [2]. Поэтому рассмотрим кинетику изнашивания контактирующих поверхностей и изменение соответствующих контактных давлений, используя графоаналитический способ.

На рис. 3, с учетом данных рис. 1, показаны диаграммы изменения контактного давления и фактического радиального натяга при фреттинг-износе контактирующих поверхностей. Горизонтальная линия (рис. 3, a) характеризует контактное давление p_0 от натяга, а линия AB — от совместного действия натяга и

статической внешней нагрузки. Горизонтальная линия (рис. 3, δ) соответствует половине радиального натяга $\Delta_{\phi}/2$. Линия A'B' — изменение натяга при действии статической нагрузки.

В соответствии с графиком на рис. 3 определены участки сцепления и проскальзывания: φ_1 угол, характеризующий сцепление, где контактные касательные силы пропорциональны касательным смещениям; $\Delta \varphi_1 = \varphi_2 - \varphi_1$ участок проскальзывания, где касательные контактные силы пропорциональны контактному давлению; $\Delta \varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_2$ — участок сцепления.

От коэффициента трения скольжения зависят размеры участков сцепления и проскальзывания в зоне контакта [5]. С увеличением коэффициента трения зона сцепления возрастает, а зона проскальзывания уменьшается.

По мере линейного изнашивания контактирующих поверхностей натяг на дуге проскальзывания линейно уменьшается и, соответственно, уменьшается контактное давление. При этом участок проскальзывания расширяется, а область сцепления сужается [6].

При величине износа контактирующих поверхностей ΔU , равной половине радиального натяга $\Delta/2$, в некоторой точке произойдет потеря герметичности соединения и минимальное контактное давление, соответствующее максимальной нагрузке, обратится в ноль, т.е. *р*_{мин} = 0 (точка *D*). Ординаты ломаной линии CDE характеризуют контактное давление в зоне проскальзывания при потере герметичности соединения. Ординаты, заключенные между линиями С'Е' и С'D'Е', характеризуют износ ΔU в любом сечении зоны проскальзывания при циклическом нагружении. Следовательно, "потерянный" натяг является мерой износа контактирующих поверхностей.

В качестве меры изнашивания введем безразмерный параметр, равный отношению величины износа к величине радиального натяга $\Pi = \Delta U / \Delta / 2$. В точках *C*' и *E*' $\Pi = 0$, а в точке *D*' $\Pi = 1$.

При уменьшении циклической нагрузки контактное давление в точке *D* возрастает и соединение становится герметичным. Таким образом, при циклической внешней нагрузке в соединении с натягом создаются условия циклического процесса потери герметичности соединения. При этом вследствие трения возможна разность фаз циклического контактного давления и внешней нагрузки.

Фреттинг-износ соединения с натягом условно можно разделить на две фазы: износ до потери герметичности и износ до разрушения. Предельная точка Г соответствует разрушению соединения, где имеет место неблагоприятное сочетание концентрации напряжений $K_{\rm фрет}$ за счет фреттинг-износа и возникают наибольшие кольцевые напряжения σ_t . Угловая координата точки Г ориентировочно определяется наибольшей величиной произведения pU_t (где U_t — относительное смещение поверхности от-



Рис. 4. Зависимость между фактическим натягом Δ_{ϕ} и номинальным (измеренным) натягом Δ_{μ} (1) до постановки болта в отверстие и эффективного коэффициента фреттинга от фактического натяга (2)

верстия и болта [7]). Коэффициент $K_{\rm фрет}$ в значительной степени зависит от глубины износа поверхности отверстия.

Болтовое соединение с натягом будет надежно работать, пока износ не достигнет значения, равного половине натяга (до образования зазора). Поэтому $K_{\rm фрет}$ следует определять по величине "потерянного" натяга при изнашивании элементов соединения.

Значение $\Delta_{\phi}/2$ эквивалентно шероховатости *Rz*, являющейся источником концентрации напряжений $K_{f\sigma}$ [7]. Коэффициент $K_{f\sigma}$ в зависимости от *Rz* для алюминиевых деформируемых сплавов приведены в работе [8].

Коэффициент $K_{\text{фрет}}$ вычисляется по формуле:

$$K_{\rm deper} = 1/K_{f\sigma}.$$
 (3)

На рис. 4 показана зависимость $K_{\phi pet}$ от фактического натяга Δ_{ϕ} . Здесь же показана зависимость Δ_{ϕ} от номинального (измеренного) $\Delta_{\rm H}$ до постановки болта в отверстие, стрелки указывают направление движения при определенном номинальном натяге $\Delta_{\rm H}$. Полученные зависимости хорошо согласуются с экспериментальными данными для проушины из алюминиевого сплава 7075T651 (B95T1) при номинальном натяге 0,3...1 % ($K_{\rm dpet}$ = 1,2) [9].

Для проверки описанных выше закономерностей изнашивания элементов соединения проведены исследования по количественной оценке износа, основанные на потере герметичности соединения при циклических перегрузках [10]. Показателем фреттинг-изнашивания выбрана величина фактического натяга, которая при циклическом нагружении уменьшается до появления зазора при определенном числе N циклов нагружения. Фактический натяг определяли экспериментально после нескольких предварительных запрессовок-выпрессовок штифта.

Максимальное напряжение σ_{max}^{6p} в сечении брутто зависит от числа *N* циклов до потери герметичности и до разрушения низкосдвигового соединения из алюминиевого сплава Д16АТ при фактическом натяге 0,52 %. При низких значениях нагрузки (σ_{max}^{6p} = 120 МПа) наблюдали пересечение линий герметичности и разрушения. То есть разрушение



образцов проходило без потери герметичности. При $K_{\rm dper} = 1$ и создаются благоприятные условия для исключения относительного движения контактирующих поверхностей и, как следствие, полного предотвращения фреттинг-износа.

В условиях фреттинг-износа полный коэффициент концентрации напряжений *K*₁ представляет собой произведение коэффициентов концентрации [11, 12]:

$$K_t = K_{\text{dper}} K_{\text{s}\phi\phi}, \qquad (4)$$

где $K_{3\phi\phi}$ — эффективный коэффициент концентрации напряжений для пластины с отверстием, но без фреттинг-фактора;

*К*_{фрет} — эффективный коэффициент фреттинга, соответствующий герметичности соединения.

Таким образом, зная K_t для конкретного натяга, значения долговечности соединения с учетом влияния фреттинга можно определить по методике, изложенной в работе [12].

Полученные результаты дают возможность на стадии проектирования болтовых соединений с натягом [13] определять условия минимизации повреждений вследствие фреттинга.

Библиографический список

1. **Уотерхауз Р.Б.** Фреттинг-коррозия: пер. с англ. Л.: Машиностроение, 1976. 272 с.

2. **Проников А.С.** Надежность машин. М.: Машиностроение, 1978. 592 с.

3. **Сухарев И.П.** Прочность шарнирных узлов машин: справочное пособие. М.: Машиностроение, 1977. 168 с.

4. Даширабданов В.Д., Ушаков Б.Н. Определение напряжений и предельных нагрузок крепежных соединений с натягом методом конечных элементов // Известия вузов. Машиностроение, 1986. № 6. С. 3–7.

5. Моссаковский В.И., Гудрамович В.С., Макеев Е.М. Контактные задачи теории оболочек и стержней. М.: Машиностроение, 1978. С. 248 с.

6. Цыбанов Г.В., Кураш Ю.П. Оценка циклической долговечности стали 15кп в условиях фреттинга при варьировании уровня контактного напряжения и размера контртела // Проблемы прочности. 2007. № 6. С. 61–74.

7. Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. Расчеты деталей машин и конструкции на прочность и долговечность. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.

8. Степнов М.Н., Гиацинтов Е.В. Усталость легких конструкционных сплавов. М.: Машиностроение, 1973. 320 с.

9. Бойцов Б.В., Кишкина С.И., Кравченко Ю.А. Долговечность шарнирно-болтовых соединений летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1966. 256 с.

10. Дунаев В.В., Ширшов А.А. Исследование герметичности болтовых соединений с радиальным натягом // Вестник машиностроения. 2004. № 1. С. 16—19.

11. Дроздов Ю.Н., Сильвестров И.Н., Ушаков Б.Н. Анализ контактных напряжений в задачах износа и фреттинг-усталости // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 2. С. 50—54.

12. **Сильвестров И.Н., Сухарев И.П.** Расчет шарнирных элементов на усталость с учетом фреттинг-фактора // Вестник машиностроения. 1997. № 5. С. 16—20.

13. Ушаков Б.Н., Дунаев В.В. Прочность предварительно-напряженных крепежных соединений летательных аппаратов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2009. № 2. С. 40–45.



Э.А. Буланов, д-р техн. наук

(Московский государственный университет технологии и управления им. К.Г. Разумовского) E-mail: b1u237@mail.ru

Давление сыпучего тела на стенки силоса. Плоская задача

Получено точное решение уравнений статики сыпучего и упругого твердого тела для плоской задачи методами моментной теории механики сплошных сред, в которой закон парности касательных напряжений не выполняется. Получено уравнение для коэффициента бокового давления из анализа напряженного состояния элемента объема сыпучего тела в щелевом силосе. Сравнение расчетов с экспериментальными данными показывает, что сыпучее тело в силосе не находится в состоянии предельного равновесия.

The obtained exact solution of the equations of statics of granular and elastic solids for a flat torque problem by the theory of continuum mechanics, in which the law of twinning shear stresses is not performed. The equation for the coefficient of lateral pressure from the analysis of the stress state of an element of volume of loose body in the aperture of the silo. Comparison of calculations with experimental data shows that the loose body in the silo is not in a state of limit equilibrium.

Ключевые слова: сыпучее тело, боковое давление, коэффициент трения.

Keywords: loose body, lateral pressure, the coefficient of friction.

Введение

Решение задач статики любого тела основывается на решении уравнений равновесия. Для плоской задачи в координатах *хz* дифференциальные уравнения равновесия с учетом собственного веса

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \gamma = 0; \quad \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0, \quad (1)$$

где γ — вес единицы объема.

В классической (безмоментной) теории упругости твердого тела уравнение моментов для элементарного объема приводит к закону парности касательных напряжений, согласно которому $\tau_{xz} = \tau_{zx}$. Для сыпучего тела в большинстве задач $\tau_{xz} \neq \tau_{zx}$, поэтому уравнения (1) для сыпучего тела являются нерешаемыми для классической механики сплошных сред.

В моментной теории упругости при $\tau_{xz} \neq \tau_{zx}$ уравнение моментов [1]:

$$\tau_{xz} - \tau_{zx} + \frac{\partial \mu_{zy}}{\partial z} - \frac{\partial \mu_{xy}}{\partial x} = 0,$$

где µ_{zv}, µ_{xv} — моментные напряжения.

Касательные и моментные напряжения приводят к сдвигу и повороту частиц сыпучего тела, однако уравнения деформаций, перемещений для сыпучего тела неприменимы.

Связь между касательными τ и нормальными σ напряжениями в сыпучей среде определяется на основе экспериментальной зависимости [2]:

$$\tau = f\sigma + \tau_0,$$

где $f = tg\phi$ — коэффициент внутреннего трения;

 τ_0 — начальное сопротивление сдвигу, характеризует сцепление частиц сыпучего тела между собой. При $\tau_0 = 0$ сыпучее тело называют идеально сыпучим.

В упругом теле касательные напряжения достигают наибольшего значения по площадкам, составляющим с главными площадками углы 45°. В твердых телах по этим площадкам происходит деформация сдвига. В сыпучих телах опасными в отношении сдвига будут не те площадки, по которым действуют наибольшие касательные напряжения, а те, на которых они достигают своего предельного значения $\tau = f_{\sigma} + \tau_0$. На этих площадках и произойдет сдвиг, скольжение. В массе сыпучего тела совокупность таких площадок образует поверхность скольжения.

Теория решения ряда задач статики сыпучего тела на основе последовательного определения площадок скольжения и действующих по ним напряжений разработана для плоских задач В.В. Соколовским, для осесимметричных задач В.Г. Березанцовым. Однако в этой теории уравнения равновесия не имеют аналитического решения. Также в ряде задач невозможно доказать, находится или нет сыпучее тело в состоянии предельного равновесия. Одна из таких задач — определение напряжений в силосе.

На практике широкое применение получила методика Х. Янсена, согласно которой осевое и боковое давления определяли по формулам [2]:

$$\sigma_z = -\frac{\gamma A}{f_1 m_0 p} \left(1 - e^{-f_1 m p z/A}\right); \ \sigma_x = m_0 \sigma_z, \qquad (2)$$

где А, р — площадь, периметр сечения силоса;

 f_1 — коэффициент трения о стенки силоса.

Формулы получены из условий равновесия элемента объема силоса dV = Adz.

Коэффициент бокового давления

$$m_0 = \mathrm{tg}^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) = \frac{\left(1 + f^2\right)^{0.5} - f}{\left(1 + f^2\right)^{0.5} + f} \tag{3}$$

определяли из анализа напряженного состояния элемента объема сыпучего тела в рамках классической механики сплошных сред при условии предельного равновесия. При определении бокового давления методика Х. Янсена дает заниженные значения, поэтому на практике рекомендуется увеличивать результаты примерно в 2 раза [2].

Решение уравнений равновесия для идеально сыпучего тела в силосе

Сыпучее тело в силосе (щелевой силос размерами $2b \times 2l$ при $l \gg b$) находится под действием собственного веса и сил трения о стенки силоса. При отсутствии трения на стенках и днище силоса ($f_1 = 0$; $\tau_{zx} = 0$; $\tau_{xz} = 0$) уравнения равновесия (1) примут вид:

$$\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \gamma = 0; \ \frac{\partial (m_0 \sigma_z)}{\partial x} = 0,$$

откуда $\sigma_z = -\gamma z$, а m_0 — коэффициент бокового давления при $f_1 = 0$, величина которого из уравнений равновесия не определяется.

Рассмотрим уравнения равновесия при $f_1 \neq 0$. Граничные условия:

1) при z = 0 все напряжения равны нулю;

2) $\sigma_x = m\sigma_z$, где m — коэффициент бокового давления — функция от x или постоянная величина;

3) при $x = b \tau_{xz} = f_1 \sigma_x$, при $x = -b \tau_{xz} = -f_1 \sigma_x$. Заменим $\sigma_z = -\gamma b\sigma$, тогда $\sigma_x = -\gamma bm\sigma$, $\tau_{xz} = -\gamma bf_1 m\sigma \frac{x}{b}$.

Подставляя $\sigma = \frac{1}{f_1 m} + \Delta \sigma$ в уравнения рав-

новесия, получим

$$\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial z} + \frac{\partial (f_1 x m \Delta \sigma)}{b \partial x} = 0; \quad \frac{\partial (m \Delta \sigma)}{\partial x} = 0.$$

Откуда следует, что $m\Delta \sigma = \varphi(z) - \varphi$ ункция от *z*, тогда имеем уравнение

$$\frac{\partial \varphi(z)}{\partial z} + \frac{f_1 m}{b} \varphi(z) = 0,$$

где *m* — постоянная. Решение уравнения:

$$\Delta \sigma = C \exp\left(-f_1 m \frac{z}{b}\right)/m.$$

В результате

$$\sigma_z = -\gamma b \frac{1 - Cf_1 \exp\left(-f_1 m z/b\right)}{f_1 m}.$$

Постоянные *C* и *m* получим из условия, что при $f_1 \to 0, m \to m_0, \sigma_z \to \gamma z$.

Откуда $C = -1/f_1$, а решение уравнений равновесия:

$$\sigma_{z} = -\gamma b \frac{1 - \exp(-f_{1}m_{0}z/b)}{f_{1}m_{0}};$$

$$\sigma_{x} = m_{0}\sigma_{z}; \quad \tau_{xz} = f_{1}m_{0}\sigma_{z}.$$
(4)

При $z/b \to \infty$ напряжения $\sigma_z \to -\gamma b/f_1 m_0$, $\sigma_x \to -\gamma b/f_1$.



То есть данное точное решение совпадает с решением Х. Янсена (для щелевого силоса A/p = b).

Рассмотрим аналогичную задачу для твердого, абсолютно упругого тела, используя не только уравнения равновесия, но и уравнения деформаций. Если твердое тело находится в абсолютно жестких стенках, то под действием собственного веса оно расширяется, согласно закону Пуассона, в результате создается давление на жесткие стенки. Решая уравнения равновесия, получим:

при $f_1 = 0$

$$\sigma_z = -\gamma z; \ \sigma_x = -\gamma v z,$$

где $\nu = \frac{\nu_0}{1 - \nu_0};$

 ν_0 — коэффициент Пуассона для материала твердого тела;

при *f*₁ ≠ 0

$$\sigma_z = -\gamma b \frac{1 - \exp(-f_1 v z/b)}{f_1 v}; \ \sigma_x = v \sigma_z; \ \tau_{xz} = f_1 v \sigma_z.$$

Относительные деформации

$$\varepsilon_x = (\sigma_x - v\sigma_z)/E = 0; \ \varepsilon_z = (1 - v^2)\sigma_z/E$$

где $E = E_0 / (1 - v_0^2);$

 E_0 — модуль упругости материала твердого тела.

Откуда перемещения по оси x равны нулю, а по оси z при условии, что на днище при z = h перемещение $u_z = 0$,

$$u_z = \frac{1-\mu^2}{E} \int \sigma_z dz = \frac{\gamma b (1-\nu^2)}{f_1 \nu E} \times \left(b \frac{\exp(-f_1 \nu h/b) - \exp(-f_1 \nu z/b)}{f_1 \nu} + h - z \right).$$

Для определения моментных напряжений воспользуемся уравнением совместности деформаций [1]:

$$\gamma = \frac{\partial u_z}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial z} = \frac{\tau_{xz}}{2G} + \int \frac{\mu_{zy}}{4B_z} dz + \int \frac{\mu_{xy}}{4B_x} dx + \gamma(x)$$

и уравнением моментов на стенке

$$\int_{0}^{h} \sigma_x z dz + \int_{0}^{h} \mu_{xy}(x=b) dz = 0$$

В результате решения уравнений получим

$$\mu_x = \gamma \left(0, 5(b^2 - x^2) + \frac{bh}{f_1} \left(1 + \frac{b}{hvf_1} \right) \left(1 - \exp(-f_1 vz/b) \right) - \frac{zb}{f_1} \right);$$

$$\mu_z = \gamma x b \left(\exp(-f_1 vz/b) - 1 \right) / v f_1;$$

$$B_x = b h G / 2f_1; \quad B_z = B_x / v.$$

Данное решение удовлетворяет всем уравнениям теории упругости.

В твердом теле в качестве коэффициента бокового давления выступает v — коэффициент Пуассона для плоской задачи.

Рассмотрим влияние сил трения на днище силоса. Напряжения на днище

$$\tau_{zx} = kf_1\sigma_z\frac{x}{b},$$

где $k \le 1$ — коэффициент податливости боковых стенок. При абсолютной жесткости стенок он равен нулю.

Представим $\sigma_z = -\gamma b\sigma$, тогда $\sigma_x = -\gamma bm\sigma$; $\tau_{xz} = -\gamma bf_1 m\sigma \frac{x}{b}$; $\tau_{zx} = -\gamma bkf_1 \sigma \frac{x}{b}$, где m — функция от x.

Подставляя $\sigma = \frac{1}{f_1 m} + \Delta \sigma$ в уравнения рав-

новесия, получим

$$\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial z} + \frac{f_1 \partial (xm\Delta \sigma)}{b \partial x} = 0; \quad \frac{\partial (m\Delta \sigma)}{\partial x} + \frac{kxf_1}{b} \frac{\partial \Delta \sigma}{\partial z} = 0.$$

Заменяя $\Delta \sigma = \varphi_z g_x / m$, где φ_z — функция от *z*, g_x — функция от *x*, получим

$$\frac{\varphi'_{z}}{\varphi_{z}} + \frac{f_{1}m}{b} + \frac{f_{1}mx}{b}\frac{g'_{x}}{g_{x}} = 0; \quad \frac{\varphi'_{z}}{\varphi_{z}} + \frac{b}{f_{1}kx}\frac{g'_{x}}{g_{x}} = 0.$$

Решение уравнений

$$\sigma_z = -\frac{\gamma b}{f_1 m} \left[1 - \exp\left(-f_1 m_0 z/b\right) \left(\frac{m_0}{n}\right)^{0.5} \right], \quad (5)$$

где $m = m_0 \left(1 - \frac{f_1 k x^2}{b^2}\right).$

При $f_1 \to 0$ и при $x \to 0$ коэффициент бокового давления $m \to m_0$.

Влияние трения на днище приводит к уменьшению коэффициента бокового давления, что противоречит экспериментальным данным. Рассмотрим влияние уплотнения сыпучего тела. При $z/b \to \infty$ напряжение σ_z стремится к постоянному значению, тогда объемную плотность представим в виде

$$\gamma = \gamma_0 \left(1 + k \left(1 - \exp\left(-\beta \frac{z}{b} \right) \right) \right)$$

где k — коэффициент уплотнения, для большинства сыпучих тел k = 0,1...0,4;

β — эмпирический коэффициент.

При z = 0 $\gamma = \gamma_0$, при $z \to \infty$ $\gamma \to \gamma_0(1 + k)$. Для решения представим $\sigma_z = -\gamma b\sigma$, тогда $\sigma_x = -\gamma bm\sigma$, $\tau_{xz} = -\gamma bf_1 m\sigma \frac{x}{b}$. Подставляя $\sigma = \frac{1+k}{f_1m} + \Delta \sigma$ в уравнения равновесия, полу-

чим

$$\frac{\partial \Delta \sigma}{\partial z} + \frac{\partial (f_1 x m \Delta \sigma)}{b \partial x} + \frac{k}{b} \exp\left(-\beta \frac{z}{b}\right) = 0; \quad \frac{\partial (m \Delta \sigma)}{\partial x} = 0.$$

Решение этих уравнений

$$\sigma_{z} = -\gamma b \left[\frac{1+k}{f_{1}m} \left(1 - \exp\left(-f_{1}m_{0}z/b\right) \right) + \frac{k}{f_{1}m_{0} - \beta} \left(\exp\left(-f_{1}m_{0}z/b\right) - \exp\left(\beta z/b\right) \right) \right].$$

При $z \rightarrow \infty$ $\sigma_z \rightarrow -\gamma b \left(\frac{1+k}{f_1 m_0} \right)$. Уплотнение

приводит к увеличению σ_z , а следовательно, и всех других напряжений, но не влияет на коэффициент бокового давления.

Точные решения уравнений равновесия для сыпучего тела показывают, что коэффициент бокового давления m не зависит от координат x, z и равен коэффициенту бокового давления m_0 , но не позволяют определить m_0 , т.е. рассматриваемая задача статически неопределима. Для определения m_0 используем анализ напряженного состояния элемента объема.

Анализ напряженного состояния элемента объема

Напряжение на наклонной площадке (рис. 1), определяемое углом α:

$$\sigma_{\alpha} = \sigma_{z} \cos^{2} \alpha + \sigma_{x} \sin^{2} \alpha - (\tau_{zx} + \tau_{xz}) \sin \alpha \cos \alpha;$$

$$\tau_{\alpha} = (\sigma_{z} - \sigma_{x}) \sin \alpha \cos \alpha + \tau_{zx} \cos^{2} \alpha - \tau_{xz} \sin^{2} \alpha.$$
(6)



Рис. 1. Напряженное состояние элемента объема сыпучего тела в откосе

В уравнениях $\sigma_x = m\sigma_z;$ $\tau_{xz} = f_1\sigma_x \frac{x}{b};$ $\tau_{zx} = f_1\sigma_z \frac{x}{b},$

где $m - \kappa_0$ коэффициент бокового давления; $f_1 - \kappa_0$ коэффициент трения о стенки и днище силоса.

Рассмотрим напряженное состояние элемента объема на стенке силоса, т.е. при x = b. На наклонной площадке $\tau_{\alpha} = f_{\alpha}\sigma_{\alpha}$, где f_{α} — коэффициент трения. Подставляя в это условие выражения (6), получим основное уравнение, которое представим в двух выражениях:

$$m = \frac{1 - f_{\alpha}/u + kf_1(1/u + f_{\alpha})}{1 - f_{\alpha}f_1 + (f_1 + f_{\alpha})u},$$
(7)

$$f_{\alpha} = \frac{1 - m + f_1 / u - f_1 m u}{1 / u + m u - f_1 (1 + m)},$$
(8)

где $u = tg\alpha;$

k — коэффициент податливости боковых стенок.

При отсутствии трения, когда $f_1 = 0$ ($\tau_{xz} = \tau_{zx} = 0$):

$$m = \frac{1 - f_{\alpha}/u}{1 + f_{\alpha}u}.$$
(9)

Максимальное значение $m = m_0$ получим, если из выражения dm/du = 0 определим

$$u_0 = f_{\alpha} + \sqrt{1 + f_{\alpha}^2}.$$
 (10)

Откуда при $u = u_0$

$$m_0 = \frac{\left(1 + f_{\alpha}^2\right)^{0.5} - f_{\alpha}}{\left(1 + f_{\alpha}^2\right)^{0.5} + f_{\alpha}}.$$

Если наибольшее значение $f_{\alpha} = f$ (предельное состояние), тогда

$$m = \frac{1 - f/u}{1 + fu};$$

$$u_0 = f + \sqrt{1 + f^2};$$

$$n_0 = \frac{\left(1 + f^2\right)^{0.5} - f}{\left(1 + f^2\right)^{0.5} + f}.$$

Приходим к выражению, полученному в классической механике сплошных сред при $\tau_{xz} = \tau_{zx} \rightarrow 0$. В моментной теории механики сплошных сред при $\tau_{zx} = 0$ и $\tau_{xz} \neq 0$, если $\tau_{xz} \rightarrow 0$ решения и должны совпадать.

К тому же результату можно прийти и другим путем. Рассмотрим макроэлемент объема силоса АБГВ (рис. 2). Предположим, что ВГ — линия скольжения. Элемент объема находится в покое или в состоянии равномерного движения, если сумма действующих на



Рис. 2. Схема сил в силосе

него сил, равна нулю. На него действуют сила веса $G = \gamma (zb - 0.5b^2 \operatorname{tg} \alpha)$, реакции *N*, *X* и сила трения *fN*.

Составив сумму проекций сил на оси *x* и *z*, получим

$$N = \frac{G}{\cos \alpha + f \sin \alpha}; \quad X = G \frac{1 - f / u}{1 / u + f};$$

где $u = tg\alpha$.

Средние значения напряжений: $\sigma_z = G/b$, $\sigma_x = X/b \operatorname{tg} \alpha$. Тогда среднее значение бокового давления $m = \frac{\sigma_x}{\sigma_z} = \frac{1 - f/u}{1 + fu}$ и не зависит от *z*.

Если рассмотреть равновесие элемента ВЕГ (см. рис. 1), то приходим к тому же результату.

Рассмотрим аналогичную задачу для твердого тела при $f_1 = 0$, анализируя напряжение состояние элемента объема для твердого тела. Для твердого абсолютно упругого тела площадки, по которым действуют максимальные касательные напряжения $\tau_{\alpha} = \tau_{\text{max}} = 0,5(1-\nu)\sigma_z$ и $\sigma_{\alpha} = 0,5(1+\nu)\sigma_z$, определяют углом $\alpha = 45^\circ$. Тогда

$$f_{\alpha} = \frac{\tau_{\alpha}}{\sigma_{\alpha}} = \frac{1-\nu}{1+\nu}.$$

Подставляя f_{α} в формулу (9) при $u_0 = 1$, получим $m_0 = v$.

Для жидкости коэффициент внутреннего трения равен нулю, тогда при $f_{\alpha} = f = 0$ из выражения (9) получим $m_0 = 1$, откуда $\sigma_x = \sigma_z = -\gamma z$. Наблюдается полная аналогия с решением для сыпучего тела.

Рассмотрим случай, когда силы трения на днище силоса равны нулю. При $\tau_{zx} = 0$ уравнения (7), (8) примут вид

$$m = \frac{1 - f_{\alpha} / u}{1 - f_{\alpha} f_{1} + (f_{1} + f_{\alpha})u}, \qquad (11)$$

$$f_{\alpha} = \frac{1 - m - f_1 m u}{1 / u + m u - f_1 m}.$$
 (12)

Значение u, при котором m максимально, получим из выражения dm/du = 0:

$$u_{02} = f_{\alpha} \left(1 + \sqrt{c} \right), \tag{13}$$

где $c = 1 + \frac{1 - f_{\alpha}f_1}{f_{\varepsilon}(f_{\alpha} + f_1)}.$

Значение u, при котором f_{α} максимально, получим из выражения $df_{\alpha}/du = 0$:

$$u_{01} = \frac{f_1}{A} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{(1-m)A}{f_1^2 m}} \right), \tag{14}$$

где $A = m(1 + f_1^2) - 1.$

Равенство $u_{01} = u_{02}$ позволяет определить минимальное значение коэффициента бокового давления *m* при максимальном значении f_{α} . Однако данный подход не позволяет определить одну из этих величин.

В состоянии предельного равновесия $f_{\alpha} = f$ из выражения dm/du = 0 следует

$$u_{02} = f\left(1 + \sqrt{c}\right),$$

где $c = 1 + \frac{1 - ff_1}{f(f + f_1)}.$

Коэффициент бокового давления, который при $f_1 \to 0$ стремится к m_0 :

$$m = 1 / \left(1 + 2f^2 + ff_1 + 2\sqrt{f(1+f^2)(f+f_1)} \right).$$

При $f_1 \neq 0$ $m \neq m_0$, но из уравнений равновесия следует, что $m = m_0$. Это возможно, если сыпучее тело в силосе находится в состоянии предельного равновесия только при x = 0, где

 $\tau_{xz} = f_1 \sigma_x \frac{x}{b} = 0.$

Анализ результатов расчета и данных эксперимента

Точное решение уравнений равновесия и определение m_0 из анализа напряженного состояния элемента объема подтверждают формулы (2) и (3). Данные эксперимента [3] ($\gamma = 1,6 \text{ кгс/см}^3$; b = 30 см; $f = f_1 = 0,577$; $m_0 = 0,333$; A/p = b/2) и

результаты расчетов осевого и бокового давления цемента в квадратном, деревянном силосе приведены в таблице.

Экспериментальные исследования показывают, что при определении осевого давления методика X. Янсена дает удовлетворительные результаты, если учесть неизбежный разброс данных при определении коэффициентов трения, а при определении бокового давления — заниженные, примерно в 2 раза. Если справедливость решения уравнений равновесия не подлежит сомнению, то предположение о том, что в центре силоса (при $f_1 = 0$) сыпучее тело находится в состоянии предельного равновесия.

Основное допущение при определении *m*₀ — коэффициент внутреннего трения принимали равным его предельному значению $f_{\alpha} = f$. Предельную величину f или f_1 определяли в испытаниях, когда верхняя часть установки с сыпучим телом и грузом равномерно перемещается по поверхности материала нижней неподвижной части. Если этот материал данное сыпучее тело, то определяют коэффициент внутреннего трения f, если этот материал, например дерево, то f₁ — коэффициент трения по дереву. Но в силосе перемещения слоев сыпучего тела нет из-за боковых стенок. Поэтому коэффициенты трения не достигают своего предельного значения, сыпучее тело не находится в состоянии предельного равновесия во всем объеме силоса. Наилучшее приближение к экспериментальным данным получается, когда коэффициент внешнего трения $f_1 = 0,432$, а коэффициент бокового давления $m = m_0 = 0,515.$

В центре силоса (x = 0) при $m_0 = 0,515$ из выражения (9) получим коэффициент внутреннего трения $f_{\alpha} = 0,338$, что составляет 0,59 от

Расчеты осевого σ_z и бокового σ_x напряжений, 10⁵, МПа

	σ_z / σ_x				
$\frac{z}{b}$	Расчет по формулам (2), (3) при $f_1 = 0,577; m_0 = 0,333$	Эксперимент	Расчет по формулам (2), (3) при $m_0 = 0,515; f_1 = 0,432$ (наилучшее приближение к экспериментальным данным)		
2	6,7/2,33	6,1/3,1	6,35/3,27		
3,33	9,01/3,0	8,2/4,2	8,33/4,29		
5	10,65/3,55	9,8/5,1	9,62/4,96		



предельного значения $f_1 = 0,577$ из формулы (11) $u_0 = 1,39$, угол наклона площадки вероятного сдвига $\alpha = 54,3^\circ$.

На стенке (x = b), подставляя в выражение (14) m = 0,515 при $f_1 = 0,432$, получим $u_{01} = 0,8$, оттуда угол наклона площадки вероятного сдвига $\alpha = 38,7^{\circ}$. А из уравнения (12) получим коэффициент трения на этой площадке, что составляет 0,37 от предельного значения f = 0,577. Существует значительный разброс экспериментальных данных по коэффициент внутреннего трения f = 0,5...0,84, коэффициент трения по дереву $f_1 = 0,3...0,4$.

Выводы

Точное решение уравнений равновесия при наличии только сил трения на стенках ($\tau_{zx} = 0$) подтверждает формулу Х. Янсена (2) и доказывает, что коэффициент бокового давления не зависит от координат *x*, *z* и является величиной постоянной и равной коэффициенту бокового давления в центре силоса — m_0 , но не позволяет определить значение этой величины.

Точное решение уравнений равновесия при $\tau_{zx} \neq 0$ противоречит экспериментальным дан-

ным, что указывает на отсутствие сил трения на днище в силосе.

Определение значения m_0 , исходя из предельного состояния, полученное различными методами, подтверждает формулу (3) которая определяет минимальное боковое давление. В случае, когда согласно экспериментальным данным коэффициент бокового давления превышает значение, полученное по формуле (3), причиной расхождения может является то, что коэффициенты внутреннего и внешнего трения в силосе не достигают своего предельного значения.

Библиографический список

1. Буланов Э.А. Моментные напряжения в механике твердого, сыпучего и жидкого тела. М.: Вузовская книга, 2012. 140 с.

2. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. М.: Стройиздат, 1977. 256 с.

3. Петров В.А. О давлении цемента на стенки и днище силосов // Гипроцемент. 1951. Вып. XIV. С. 99—120.

4. Погрузочно-разгрузочные работы с насыпными грузами: справочник / Д.С. Плюхин, Е.Г. Угодин, Е.А. Иконников, А.Н. Алькинская; под ред. Д.С. Плюхина. М.: Транспорт, 1989. 303 с.



Уважаемые коллеги!

Приглашаем принять участие в научно-технической конференции

«АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, МАТЕРИАЛЫ И КОНСТРУКЦИИ»

5—6 октября 2016 г. г. Гродно, Беларусь

ТЕМАТИКА КОНФЕРЕНЦИИ

1. Аддитивные технологии: 3D-печать, формирование многослойных материалов и изделий. Программное обеспечение и оборудование.

2. Конструкционные и функциональные свойства базовых металлических, полимерных, неорганических материалов и композитов. Составы и межслоевая адгезия.

3. Направления и новые объекты применения аддитивных технологий. Подготовка кадров.

НИЦПР, Гродно, 230023, пл. Антония Тизенгауза, 7 Тел: +375(152) 77 12 78 — Шашура Люцина Иосифовна, E-mail: atmc2016@tut.by Сайт: http:\\resource-nanb.grodno.by

В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 620.162.4, 620.165, 62-213.32, 62-213.6

А.А. Емельяненко, канд. техн. наук, О.И. Жабин, Д.В. Ярошик (НИИ гидросвязи "Штиль", Волгоград) E-mail: emelyanenko_aleksei@mail.ru

Способ обеспечения прочности пластиковых корпусов-оболочек гидроакустических приборов

Рассмотрена конструктивная прочность корпусов гидроакустических приборов как прочность материала и устойчивость оболочки в условиях наружного гидростатического давления. Предложен способ обеспечения поперечной устойчивости длинных цилиндрических оболочек из упругопластичных термопластов.

Considered the structural strength of hulls of hydroacoustic devices such as material strength and stability of hull under conditions of external hydrostatic pressure. A method of ensuring lateral stability of long cylindrical hulls made of elastic-plastic thermoplastics.

Ключевые слова: термопласт, оболочка, каркас, прочность, устойчивость.

Keywords: thermoplastic, hull, frame, strength, stability.

Идея применения термопластов в корпусах-оболочках и шасси погружаемых гидроакустических приборов типа маяков и буев актуальна сегодня в АО "НИИ гидросвязи "Штиль" и соответствует мировой тенденции применения пластиков в высоконагруженных конструкциях. Анализ механических свойств, испытания опытных образцов показали целесообразность применения в условиях наружного гидростатического давления промышленных и инженерных термопластов, отвечающих требованиям к рабочему диапазону температур, электрическому сопротивлению, электромагнитной проницаемости, водопоглощению, характеристикам прочности. Так, в частности детали шасси, каркаса, корпусов нецилиндрической формы с наименьшими затратами могут быть изготовлены механической обработкой сортамента типа плит и прутков промышленных термопластов — полипропилена, поливинилхлорида и инженерных термопластов — полиацеталя, полиамида, поликарбоната. Детали корпусов-оболочек цилиндрической формы с наименьшей механической доработкой могут быть получены из сортамента поливинилхлорида, полипропилена, полиацеталя типа труб, прутков, фитингов, заглушек. В интервале глубин от 0 до 100 м механические характеристики названных последними пластиков позволяют обеспечить требуемую прочность корпусовоболочек с затратами в 2—3 раза меньшими, чем коррозионно-стойкая сталь [2]. Экономия тем более ощутима для приборов однократного действия.

Переход к глубинам ниже 100 м потребовал выработки новых конструктивных решений. Наиболее эффективное по прочности и стоимости решение — изготовление составных двухслойных труб (пластик — сталь, пластик — алюминиевый сплав) с натягом между слоями [3] — не всегда допустимо из-за ограничения массы, электромагнитной проницаемости и т.п. Поэтому было рассмотрено другое решение — цилиндрическая оболочка на кольцевом (шпангоутном) каркасе.

Поскольку известно, что эллиптические торцевые заглушки всегда обеспечивают больший запас прочности, чем цилиндрическая часть оболочки при равной толщине и одинаковом материале, то задача сводится к обеспечению равной прочности цилиндрической и эллиптических торцевых частей оболочки. Характер деформации цилиндрической части оболочки зависит от соотношения ее диаметра, толщины стенки и длины. Соотношение характеризуется гибкостью трубы [1]

$$\lambda = \mu l/i,$$

где µ — коэффициент Пуассона материала трубы;

l — длина трубы;

i — радиус инерции поперечного сечения трубы, $i = \frac{1}{4}\sqrt{d_{\rm H}^2 + d_{\rm B}^2};$

 $d_{\rm H}$ — наружный диаметр трубы;

*d*_в — внутренний диаметр трубы.

Гибкостью трубы определяется в свою очередь коэффициент продольного изгиба φ , т.е. опасность потери продольной устойчивости прежде превышения предела прочности. Однако в случае гидростатического сжатия существует и опасность потери поперечной устойчивости (сплющивания) трубы.

Существует два пороговых отношения l/i. Нижний порог — это значение, ниже которого (рис. 1, область $\lambda_0 \dots \lambda_1$) труба разрушится (необратимо деформируется) из-за преодоления предела прочности ее материала, но не по причине потери устойчивости. Область $\lambda_0 \dots \lambda_1$ соответствует наибольшему гидростатическому давлению. На практике это означает, что нарушение целостности оболочки произойдет из-за потери устойчивости ее эллиптических торцов. Кроме того, размещение компонентов прибора в столь короткой оболочке практически невозможно.

В области значений l/i выше нижнего порога, но ниже верхнего (рис. 1, область $\lambda_1...\lambda_2$) труба потеряет продольную устойчивость при гидростатическом давлении меньшем, чем в предыдущей области. И поскольку в стенках трубы действуют одновременно с осевыми тангенциальные напряжения (радиальными можно пренебречь), то разрушение трубы произойдет по механизму хрупкого сдвига — с лавинообразным трещинообразованием и множеством осколков [3].



Рис. 1. Качественная зависимость допустимого результирующего напряжения от гибкости трубы

Выше верхнего порога значений l/i (рис. 1, область правее λ_2) труба потеряет поперечную устойчивость при наименьшем гидростатическом давлении. Эта область наиболее актуальна для всплывающих гидроакустических приборов, поскольку длина их оболочки обеспечивает не только размещение элементов питания и электронных компонентов, но и плавучесть приборов в вертикальном положении с обязательной надводной частью. Способ обеспечения равной прочности (устойчивости) стенок трубы и эллиптических заглушек в этой наиболее опасной области значений l/i обеспечит еще больший запас прочности оболочки в областях меньших значений l/i.

Задача состоит в том, чтобы обеспечить поперечную устойчивость цилиндрических оболочек, выполненных из упругопластичных термопластов, в условиях наружного гидростатического давления в области длинных труб (правее λ_2).

Традиционным способом усиления оболочек с наименьшей материалоемкостью является применение каркаса. При одинаковой материалоемкости шпангоутный каркас эффективнее стрингерного. Наиболее же эффективна их комбинация. В нашем случае комбинированный шпангоутно-стрингерный каркас в его традиционном понимании, когда оболочка опирается и на шпангоуты, и на стрингеры, был бы технологически неоправдан. Поэтому было принято решение связать кольцевые шпангоуты стойками, которые, повышая продольную устойчивость оболочки, не служат ей дополнительными опорами в поперечном направлении. В качестве опытных образцов приняли оболочки из трубы с эллиптическими заглушками: наружный диаметр трубы 125 мм, толщина стенки 4,8 мм, длина 1000 мм, толщина стенки эллиптической заглушки 10 мм (вдвое толще стенки трубы); материал трубы и заглушек — поливинилхлорид — упругопластичный термопласт. Длина трубы выбрана не столько по соображениям соответствия предполагаемому прибору, сколько как заведомо соответствующая области *l/i*, где происходит потеря поперечной устойчивости.

Первый образец (рис. 2, *a*) — оболочка без каркаса — подтвердил нахождение размеров трубы в области потери поперечной устойчивости (рис. 2, *б*). Давление сплющивания 10 атм равно номинальному внутреннему давлению сортамента, т.е. с точки зрения направления потери устойчивости и значения давления сплющивания такую трубу можно считать бесконечно длинной.

Второй образец (рис. 3, *a*) имел каркас, составленный из 11 колец, связанных тремя рядами стоек. Материал колец — поливинилхлорид, материал стоек — латунь. Толщина колец 10 мм, высота 8 мм, шаг каркаса 84 мм. Давление сплющивания оболочки (рис. 3, δ) — 12 атм. Столь несущественное увеличение



Рис. 2. Оболочка без каркаса:

a — 3D-модель; *б* — опытный образец после нагружения гидростатическим давлением 10 атм



Рис. 3. Оболочка с каркасом (кольца из поливинилхлорида):

а — 3D-модель; *б* — опытный образец после нагружения гидростатическим давлением 12 атм

устойчивости делает малоперспективными варианты с меньшим шагом каркаса или большей толщиной колец. Заменить же кольца дисками не представляется возможным из-за необходимости размещения в оболочке компонентов прибора.

> В третьем образце был прикаркас, заведомо более нят устойчивый, чем оболочка, чтобы вывести ее из области поперечного сплющивания и привести к сдвиговому (хрупкому) характеру разрушения. Третий образец (рис. 4, а) имел каркас, составленный из 14 колец, связанных тремя рядами стоек. Материал колец и стоек — сталь 10. Толщина колец 15 мм, высота 8 мм, шаг каркаса 64 мм. Посадка колец в оболочке — беззазорная. Осколочный характер разрушения (рис. 4, б), преобладающее направление трещин 45° к осевой и тангенциальной составляющим нагружения, давление



Рис. 4. Оболочка с каркасом (кольца из стали 10): *а* — 3D-модель; *б* — опытный образец после нагружения гидростатическим давлением 60 атм

разрушения оболочки 60 атм — все это говорит о том, что оболочка выведена из области потери поперечной устойчивости и разрушается по причине превышения предела прочности материала на сдвиг. Другими словами, предел сопротивления потере поперечной устойчивости преодолен и оболочка разрушается под действием наибольшего гидростатического давления. Давление разрушения оболочки в 6 раз больше, чем давление потери поперечной устойчивости. Дальнейшее усиление каркаса за счет уменьшения шага будет увеличивать сопротивление оболочки, но масса корпуса будет возрастать.

Разрушение оболочки происходит не по всей ее длине, а локализовано на периферии (см. рис. 4, δ), у торца заготовки в отличие от коротких образцов без каркаса, разрушающихся целиком, по всей длине [3]. Это объясняется ступенчатым уменьшением осевых напряжений оболочки между шпангоутами от ее торцов к середине. Монтажная (до нагружения) посадка оболочки на шпангоуты имеет нулевой зазор. Радиальная составляющая гидростатического давления создает в посадке натяг, а в оболочке — прогиб, превращая соединение из подвижного в неподвижное, вследствие чего осевая нагрузка перераспределяется между оболочкой и стальным каркасом. При равенстве тангенциальных напряжений по длине оболочки осевые напряжения максимальны на периферии оболочки, у ее торцов, где оболочка не разгружена каркасом или разгружена в наименьшей степени. Здесь и происходит разрушение от совместного действия тангенциальных и осевых напряжений. Отсюда вытекает конструктивная мера по обеспечению равной прочности по длине оболочки на каркасе: оболочка должна опираться на шпангоуты по всей длине от торца до торца, торцы оболочки должны примыкать к торцам крайних шпангоутов.

Таким образом, стальной (как вариант алюминиевый) шпангоутно-стоечный каркас является эффективным решением задачи обеспечения поперечной устойчивости упругопластичных термопластовых оболочек любой длины. Он позволяет вывести напряженнодеформированное состояние оболочки из области ее устойчивости в область прочности ее материала при минимальной стоимости материалов и технологии изготовления корпусовоболочек.

Достигнутое давление втрое превышает требуемое для маяков, выбрасываемых с глубины 200 м.

Библиографический список

1. Дарков А.В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1975. 654 с.

2. Емельяненко А.А., Бабкин С.Г. Концепция применения пластиков для изготовления корпусов и шасси гидроакустических приборов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 7. С. 40—45.

3. Емельяненко А.А., Бабкин С.Г. Об опыте использования пластиков в качестве материалов корпусов гидроакустических приборов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 11. С. 36—40.

30**00(0**(0)000

УДК 004.4

Г.В. Зеленко, А.Р. Кадиев, канд-ты техн. наук (Московский технологический университет), **А.А. Рощин,** канд. техн. наук (Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН), **А.В. Рощин,** канд. техн. наук (Московский технологический университет) Email: kadiev_ar@mail.ru

Поиск оптимального пути в графе сенсорной локальной сети для оценки ее работоспособности

Рассмотрен метод поиска оптимального пути в графе сенсорной локальной сети для оценки ее работоспособности и пример применения предложенного метода.

The article deals with the method of search of an optimal path in the graph of a sensor network to estimate its working capacity. The application example of the proposed method is given.

Ключевые слова: сенсорная локальная сеть, граф, оптимальный путь, работоспособность.

Keywords: sensory LAN, graph, optimum way, working capacity.

Работоспособность сенсорной локальной сети зависит от наличия путей передачи данных между каждым обычным и одним или несколькими управляющими узлами и обратно [1, 2]. Решение проблемы оценки наличия оптимальных путей между узлами произвольного графа, которым описывается сенсорная локальная сеть, показано в работах [1, 2] для тривиального случая — при наличии бинарных связей между вершинами графа.

Рассмотрим более сложный случай, когда учитывается пропускная способность каналов связи между узлами сети. Оценим не только принципиальную работоспособность сенсорной сети, но и косвенно — качество ее работы, так как минимальность пути оценивается не числом пройденных пакетом узлов, а суммарным временем прохождения пакета.

В общем случае время прохождения пакета по маршруту длиной *l* можно описать соотношением:

$$t_l = lt_{y_{3,\Pi}} + \sum_{i=1}^l t(i, i+1),$$

где t_l — суммарное время прохождения пакета по маршруту длиной l;

 $t_{y_{37}}$ — время обработки пакета внутри узла (предполагается, что оно одинаково для всех узлов);

t(i, i + 1) — время прохождения пакета от *i*-го узла маршрута к (i + 1)-му.

В общем случае время обработки пакета внутри узла существенно меньше времени передачи его от узла к узлу, поэтому при первом рассмотрении его не учитываем. Рассмотрим задачу нахождения оптимальных маршрутов в сенсорной сети только по времени передачи пакетов между узлами.

Постановка задачи

Имеется сенсорная локальная сеть в виде графа, где ребра между вершинами описывают величину, обратную пропускной способности соответствующего канала связи (величину, характеризующую некоторую эквивалентную длину пути между соседними вершинами), а вершины являются узлами такой сети. На ребрах графа проставлены коэффициенты, характеризующие эквивалентную длину пути между узлами. Чем меньше коэффициент, тем выше пропускная способность соответствующего канала и тем меньше эквивалентная длина пути.

Необходимо найти оптимальный маршрут из одного узла *A* сети к узлу *B*, находящемуся в произвольной вершине графа. Сумма коэффициентов на ребрах оптимального маршрута не должна быть больше суммы коэффициен-



тов на любом другом маршруте, соединяющем узлы *A* и *B*. Коэффициент, приписанный ребру будем считать условной длиной этого ребра, тогда задачу нахождения оптимального маршрута можно формулировать в терминах нахождения кратчайшего маршрута по графу. Для решения задачи используем модифицированный алгоритм Дейкстры [4].

Алгоритм поиска маршрута

Для поиска маршрута каждый узел графа помечаем вещественным числом — условным расстоянием (согласно условным длинам ребер, т.е. их пропускным способностям) между данным узлом и конечным. Необходимо предусмотреть возможность отсутствия метки узла, т.е. установки для него бесконечного расстояния (для этого можно использовать вещественное значение "бесконечность", или, например, отрицательное число). Перед поиском маршрута необходимо сбросить (перевести в бесконечность) все метки узлов графа. Если после разметки графа в каких-либо узлах не будет метки, значит из этих узлов невозможно добраться до конечной точки. Кроме вещественной метки, в каждом узле графа будет запоминаться узел на конце ребра, ведущего в направлении конечного узла сети по кратчайшему пути. В результате после разметки графа получаем последовательность узлов, ведущую от начального узла к конечному.

Итеративный процесс разметки графа организован следующим образом: имеется множество узлов графа с известными метками, обрабатываемых в данной итерации (множество T), и множество узлов, которые нужно будет обработать в следующей (множество Z). Перед первой итерацией устанавливаем в конечном узле метку 0, и добавляем его в множество T, множество Z делаем пустым.

В каждой итерации перебираем все узлы из множества T (метки для которых уже известны) и вычисляем метки для всех узловсоседей, соединенных с ними ребрами. Таким образом, для каждого узла Y_i из множества T рассматриваем только соседние узлы Y_j , которые непосредственно соединены с рассматриваемым узлом.

Для каждого узла Y_j , соединенного с узлом Y_i из множества T, вычисляем предполагаемое значение метки $M_{np(i)}$ по известной метке $M_{(i)}$

узла Y_i и условной длине (пропускной способности) ребра $Y_i - Y_i$:

$$M_{\text{пр}(j)} = M_{(i)} + \langle$$
длина ребра $Y_i - Y_j \rangle$.

Если узел Y_i отстоит от конечного узла маршрута на условное расстояние $M_{(i)}$, то его сосед Y_j отстоит от конечного узла на $M_{np(j)}$. Однако может оказаться так, что в узле Y_j уже есть метка $M_{(j)}$. В зависимости от наличия этой метки и ее значения выполняется одно из следующих действий:

1. Метка $M_{(j)}$ отсутствует (равна бесконечности). В этом случае узлу Y_j присваивается метка $M_{\text{пр}(j)}$ и этот узел добавляется в множество Z — он будет обработан в следующей итерации. Дополнительно в узле Y_j сохраняется ссылка на узел Y_i — на данный момент кратчайший маршрут из Y_j в конечный узел проходит через него.

2. $M_{(j)} \leq M_{np(j)}$. Уже существующая в узле Y_j метка оказалась меньше вычисленной по узлу Y_i . Это значит, что узел Y_j уже рассматривался ранее, и расстояние до конечного узла тогда было короче. Такая ситуация возможна при наличии нескольких параллельных маршрутов разной условной длины между Y_j и конечным узлом, причем рассматриваемый в данный момент маршрут, частью которого является узел Y_i , не самый короткий из них. В этом случае метка узла Y_j не изменяется, никаких дополнительных действий не проводится.

3. $M_{(j)} > M_{np(j)}$. Уже существующая в узле Y_j метка оказалась больше вычисленной по узлу Y_i . Узел Y_j уже рассматривался ранее, но маршрут до конечного узла оказался длиннее, чем маршрут через узел Y_i . В этом случае метка узла Y_j заменяется на $M_{np(j)}$, узел Y_j добавляется в множество Z — он будет обработан в следующей итерации. Дальнейшая обработка этого узла необходима, так как его метка уменьшилась, и следует уменьшить метки остальных связанных с ним узлов. Ссылка на узел, ранее хранившаяся в Y_j , заменяется на ссылку Y_i — теперь через Y_i проходит более короткий маршрут к конечному узлу.

После того, как все узлы множества T обработаны, в него копируем все содержимое множества Z, а само множество Z очищаем. Затем проводим следующую итерацию, в которой обрабатываются все узлы из T. Разметка графа считается завершенной тогда, когда после очередной итерации множество Z оказалось пустым, т.е. в графе не появилось ни одной новой метки.



В результате такой разметки в графе выделяется дерево с корнем в конечном узле, описывающее кратчайший маршрут от любого узла графа до конечного узла. Метка в узле соответствует условному расстоянию между конечным узлом и данным, а сам маршрут можно получить, двигаясь по запомненным в узлах ссылках до корня дерева.

В качестве примера рассмотрим граф с восемью узлами (рис. 1).

Начальным узлом будем считать узел A, конечным — узел E. В графе существует три параллельных маршрута: A-B-C-D-E (условная длина 346), A-H-F-E (условная длина 249) и A-G-E (условная длина 335). Разметка графа позволит выбрать из них кратчайший.

Перед первой итерацией в конечный узел заносится метка 0, множество *T* содержит единственный узел *E*, множество *Z* — пустое (рис. 2).

После первой итерации узлы D, F и G получают метки 92, 67 и 150 соответственно (нулевая метка узла E, к которой прибавлены длины, т.е. пропускные способности, соответствующих ребер). Во всех этих узлах запоминается ссылка на узел E (рис. 3).

После второй итерации узел C получает метку 189 от узла D, узел H — метку 160 от узла F, узел A — метку 335 от узла G. Хотя начальный узел уже получил метку, это может быть не кратчайший путь к узлу E. Множество Z не пустое, поэтому итерации продолжаются (см. рис. 3).

После третьей итерации узел *В* получает метку 276 от узла *C*. Узел *A* не может передать в узел *B* метку 335 + 70 = 405 — она не принимается, так как в узле *B* уже есть меньшая метка. Узел *A* получает новую метку 249 от узла *G* — это значение меньше старой метки 335, поэтому новая метка заменяет старую, при этом в узле *A* ста-



Рис. 1. Граф с восемью узлами

рая ссылка на узел G заменяется новой ссылкой на узел H (рис. 4).

В начале четвертой итерации множество *Т* будет содержать два узла, метки которых были изменены в предыдущей итерации: узел *A* и узел *B*.





Рис. 4. В конце третьей итерации: $T = \{C, H, A\}, Z = \{A, B\}$



Ни один из этих узлов не сможет установить новые метки в соседних узлах, так как вычисленные значения меток будут больше уже имеющихся. В результате после четвертой итерации множество Z окажется пустым, и на этом разметка графа будет завершена. На рис. 4 хорошо видно образовавшееся дерево ссылок узлов, ведущее к конечной точке. Двигаясь по ссылкам от узла A, получаем кратчайший маршрут к узлу E: A-H-F-E.

Для усложнения задачи добавим в граф дополнительные ребра (рис. 5). Снова будем искать маршрут от A до E.

Как и для первого графа, перед первой итерацией (рис. 6) в конечный узел заносится метка 0, множество T содержит единственный узел E, множество Z — пустое.

В первой итерации узел *E* передает в соседние узлы *D*, *F* и *G* метки 92, 67 и 150, соот-







ветственно длине ребер. Эти узлы получают ссылки на узел *E* (рис. 7).

Во второй итерации узел D передает в узел C метку 189. Узел F передает в узел H метку 160 и заменяет метку 92 в узле D меньшим значением 70, при этом ссылка узла D теперь будет указывать на узел F, а не на E. Узел G передает в узел A метку 335. Он не может передать метку 160 в узел H, поскольку там уже есть метка с таким же значением, полученная от F (рис. 8).

В третьей итерации узел H передает метку 165 в узел B и метку 249 в узел A, заменяя в нем старую метку 335. Узел C не может передать метку 276 узлу B, так как так уже есть метка с меньшим значением. Узел D заменяет метку 189 в узле Cна 167 и переключает ссылку этого узла на себя. Узел A не может никуда передать метку, поскольку все узлы вокруг него уже имеют метки с меньшими значениями (рис. 9).



Рис. 7. В конце первой итерации: $T = \{E\}, Z = \{D, F, G\}$



Рис. 8. В конце второй итерации: $T = \{D, F, G\}, Z = \{C, D, H, A\}$



Рис. 9. В конце третьей итерации: $T = \{C, D, H, A\}, Z = \{C, B, A\}$

В четвертой итерации узлы C и A не передают никуда меток, узел B заменяет в узле A метку 249 на 235 и переключает ссылку узла A на себя. В пятой итерации узел A не сможет изменить метки в дних узлах, поэтому множество Z будет пустым и разметка графа завершится. Найденный маршрут — A - B - H - F - E (рис. 10).

Таким образом, получен метод поиска оптимальных путей в графе сенсорной локальной сети, учитывающий пропускную способность каналов связи между узлами и основанный на теоретико-множественном подходе.



Рис. 10. В конце четвертой итерации: $T = \{C, B, A\}, Z = \{A\}$

Библиографический список

1. Баранов М.А., Зеленко Г.В., Рощин А.В. Проблемы маршрутизации сообщений в сенсорной локальной сети // Информационные технологии. 2014. № 11. С. 8—12.

2. Баранов М.А., Зеленко Г.В., Рощин А.В., Степанова И.В. Проблемы идентификации сенсорной локальной сети // VII международная научно-практическая интернет-конференция "Актуальные проблемы аппаратнопрограммного и информационного обеспечения науки, образования, культуры и бизнеса". [Электронный ресурс]. URL: http: // it4-mgupi.ru/conference/iconf_vii.html.

Оре О. Теория графов. М.: Наука, 1980. 336 с.
 Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with

graphs // Numerische Mathematik. V. 1. 1959. P. 269-271.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2a, 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 11.05.2016. Подписано в печать 11.07.2016. 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.



Академик СВИРИДЁНОК АНАТОЛИЙ ИВАНОВИЧ

К 80-летию со дня рождения

Анатолий Иванович Свиридёнок родился 7 июля 1936 г. в г. Орша Витебской обл. Академик Национальной академии наук Беларуси с 1986 г. (чл.-кор. с 1984 г., доктор технических наук с 1976 г., профессор с 1981 г.).

В 1959 г. Анатолий Иванович окончил Белорусский институт инженеров железнодорожного транспорта, после чего пришел на работу в Отдел механики полимеров АН БССР в г. Гомеле (с 1969 г. Институт механики металлополимерных систем АН БССР), в 1967 г. стал заведующим лабораторией, с 1969 г. заместителем директора по научной работе, с 1982 г. директором института, одновременно являясь (1987—1992 гг.) членом Президиума АН БССР. С 1990 г. работает в Научно-исследовательском центре проблем ресурсосбережения НАН Беларуси в г. Гродно. С 1991 г. главный редактор журнала "Трение и износ".

А.И. Свиридёнок разработал научные основы создания композиционных материалов, методы управления структурой и фрикционными свойствами металлополимерных систем, методы и приборы для исследования поверхностных свойств полимеров и композитов на их основе. Совместно с учениками провел комплексные исследования взаимосвязи структуры и свойств композиционных материалов фрикционного назначения. Инициировал развитие в Беларуси исследований в области нанотрибологии и биомеханики стопы. Разрабатывает методологические вопросы ресурсосбережения.

В 1972 г. получил Государственную премию БССР за разработку теоретических основ создания фрикционных материалов и конструкций из полимеров и металлополимеров и внедрение их в народное хозяйство. Награжден орденом Знак Почета (1981), медалями.

Анатолий Иванович является автором более 300 научных работ, в том числе 17 монографий, более 150 изобретений.

Основные труды:

Зубчатые передачи из пластмасс. Мн.: Наука и техника, 1965 (совместно с В.А. Белым, С.В. Щербаковым); Трение полимеров. М.: Наука, 1972 (в соавторстве); Friction and wear in polymer-based materials. Oxford; New York: Pergamon Press, 1982 (with coauthors); Акустические и электрические методы в триботехнике. Мн.: Наука и техника, 1987 (в соавторстве); Материаловедение и конструкционные материалы. Мн.: Высшая школа, 1989 (в соавторстве); Механика дискретного фрикционного контакта. Мн.: Навука і тэхніка, 1990 (совместно с С.А. Чижиком, М.И. Петроковцом); Electrophysical Phenomena in the Tribology of Polymers. Amsterdam: Gordon and Breach Science Publ., 1999 (with A.F. Klimovich, V.N. Kestelman); Biomechanical Science in Belarus // Proc. 13th Conference of the European Society of Biomechanics. Wroclaw: Officina Wydawn. Polytechn., 2002.

Редакция журнала, ученики, коллеги и друзья сердечно поздравляют Анатолия Ивановича, желают творческих успехов и удачи во всех начинаниях