ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

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

10 2015 (183)

СОДЕРЖАНИЕ

Экономика и организация сборочного производства

Петрухин П.Б. Алгоритмизация и оптимизация процессов мониторинга беспроводной корпоративной сети, используемой в процессах сборки и проектирования деталей и узлов 3

Сборочное оборудование и его элементы

Давыдова Е.В., Дружинина А.В., Прейс В.В. Математическая модель производительности механического дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с параметрическими отказами 11

Современные технологии сборки

Сорокин М.Н., Колтунов И.И. Схема комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" 16

Технологическая оснастка для сборки

Макаров В.Ф., Петухов Г.Д. Разработка сборных конструкций протяжного инструмента для скоростного протягивания хвостовиков лопаток компрессора из труднообрабатываемого материала 23

В помощь конструктору, технологу

Микаева С.А., **Микаева А.С.** Сборка амальгамных бактерицидных ламп низкого давления типа ДБ 32

Моисеев В.К., **Кулаков В.Г.**, **Шаров А.А.**, **Громова Е.Г.** Обеспечение взаимозаменяемости при сборке изделий из маложестких деталей за счет стесненного изгиба эластомером 37

Соединение деталей машин

Батинов И.В., Петрова Е.С. Влияние технологии изготовления штифтовых прессовых соединений на эксплуатационные свойства изделий 41

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — **79748**, Объединенному каталогу "Пресса России" — **84967**, каталогу "Почта России" — **60257**) или непосредственно в издательстве

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

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф.
А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.
М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф.
И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.
Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н.
Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.
А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф.
А.В. МЕДАРЬ, д.т.н.
Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН
В.В. ПОРОШИН, д.т.н., проф.
Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф.
А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц.
А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.
Г.А. ЯРКОВ, инж.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОМНА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

В.Ф. КУЗЬМИН, к.т.н.
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОЛЬЯТТИ

А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

ТУЛА

В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

ПОЛЬША

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

О.Г. КРАСИЛЬНИКОВА, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2015

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

10 2015 (183)

CONTENTS

Economy and the organizationof assembly

Petrukhin P.B. Algorithms and optimization of processes monitor the wireless corporate networl uses a network controller 3

Production tools and machinery for assembly

Davydova E.V., Druzhinina A.V., Prejs V.V. The mathematical model of the productivity of the mechanic disk dentate hopper feeding device with parametric failures 11

Modern technologies in assembly

Sorokin M.N., Koltunov I.I. The scheme of matching at selective assembly of "bearing" products 16

Technological equipment for assembly

Makarov V.F., Petukhov G.D. Development of prefabricated structures broaching tool for high-speed broaching shaft of the compressor blades of the cut material 23

Industrial and design engineer's aid

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S. Lamp assembly, amalgam germicidal low pressure type DB 32

Moiseev V.K., Kulakov V.G., Sharov A.A., Gromova E.G. Ensuring interchangeability at assembly of products from low-rigid details at the expense of the constrained bend an elastomer 37

Connection of mashines parts

Batinov I.V., Petrova E.S. Influence manufacturing technology pressing pin connections on the performance of the engineering products 41

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency — **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" — **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" — **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98. Fax: 8 (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

KOLOMNA
Yu.D. AMIROV

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

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTIUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

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

SAMARA
M.A. EVDOKIMOV
Yu.A. VASHUKOV
V.A. NIKOLAEV

ST.-PETERSBURG
V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOLIATI
A.I. RYZHKOV

TULA
A.I. PREYS

KHABAROVSK
V.A. LASHKO
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

POLAND
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:
O.G. KRASILNIKOVA, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-radio Broadcasting and Mass Communications Media. Registration certificate IE . 77-1747, February 25, 2000

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2015

УДК 621.316.14

П.Б. Петрухин *(Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники)*
E-mail: pavel.petrukhin@gmail.com

Алгоритмизация и оптимизация процессов мониторинга беспроводной корпоративной сети, используемой в процессах сборки и проектирования деталей и узлов

Изложена специфика беспроводной сети. Предложен новый алгоритм сканирования и мониторинга. Получены эффективные алгоритмы для достижения заданных параметров сети.

Described the specifics wireless network. Propose a new algorithm for scanning and monitoring. Obtain efficient algorithms for specific network settings.

Ключевые слова: алгоритм, автоматизация, анализатор, контроллер, оповещение.

Keywords: algorithm, automation, analyzer, controller, alert.

Введение

В настоящее время промышленность должна располагать мощной производственной базой для обеспечения выпуска машин высокого качества в целях завоевания международного рынка. Развитие автомобильной и тракторной промышленности, сельскохозяйственного машиностроения предполагает выпуск машин совершенной конструкции, позволяющих уменьшить расход топлива, а следовательно, загрязнение окружающей среды, повысить безопасность дорожного движения. Массовый характер производства такой техники базируется на высокопроизводительных автоматизированных и автоматических производственных процессах.

Решением главной задачи повышения эффективности производства является применение автоматических технологических линий с рациональным использованием материала, станочного оборудования и приспособлений, режущего и измерительного инструмента.

В условиях рыночной экономики изготовленные машины должны иметь невысокую себестоимость, быть конкурентоспособными. Качественную продукцию можно получить в условиях высокой организации производства, используя передовые технологии производства, применяя прогрессивное оборудование и оснастку при обработке деталей и сборке узлов и машин в целом.

Степень автоматизации в сборочном производстве намного ниже, чем в заготовительных и обрабатывающих производствах. Поэтому повышение уровня механизации и автоматизации в сборочных цехах и участках способствует повышению производительности труда сборщиков, сокращению их численности, снижению себестоимости продукции.

Очень важно, чтобы велась разработка высокоэффективных технологических процессов сборки.

Актуальным при этом оказывается использование беспроводных сетей в тех случаях, когда прокладка кабеля невозможна или нецелесообразна по экономическим, эстетическим соображениям либо из-за нехватки времени на развертывание кабельной инфраструктуры.

Современные беспроводные сети связи составляют серьезную конкуренцию проводным способам доступа с использованием металлических и оптических кабелей связи. Скорость передачи данных в беспроводных сетях, таких как Wi-Fi и WiMAX, уже составляет несколько мегабит в секунду. Этого достаточно для удовлетворения запросов даже самых продвинутых пользователей сети Интернет, а по удобству работы такие сети вне конкуренции.

Вместе с тем беспроводные сети связи обладают одним существенным недостатком по сравнению с проводными — они не гарантируют такого уровня безопасности и конфиденциальности, каким отличаются все технологии с закрытой средой передачи сигналов. Для получения доступа к сети связи на основе метал-

лического кабеля, например витой пары UTP-5e, требуется непосредственный доступ к среде передачи, а в случае использования оптического кабеля подключение очень сложно реализовать даже при наличии подобного доступа.

С беспроводными сетями связи все обстоит иначе: поскольку такие технологии изначально ориентированы на использование открытой среды передачи радиосигналов, доступной практически любому пользователю в зоне действия антенны, вопросы безопасности и надежности функционирования таких сетей приобретают новый смысл.

Постановка задачи

Необходимо разработать комплексный механизм мониторинга Wi-Fi сети. Изученные подходы мониторинга проводных сетей теперь дополнены и изменены с учетом особенностей беспроводных сетей.

При этом оптимизированы подходы к мониторингу подобных сетей. Найдены решения, отличные от решений мониторинга проводных сетей.

В качестве недостатка можно отметить, что система не рассчитана на масштабирование и укрупнение сетевых узлов.

Дальнейшее развитие идеи заключается в изучении особенностей LTE-сетей и внедрении данных в систему мониторинга.

Была поставлена задача обеспечения мониторинга и бесперебойной работы небольшой корпоративной сети. Структура беспроводной сети связи приведена на рис. 1.

В состав беспроводной сети связи входят следующие элементы:

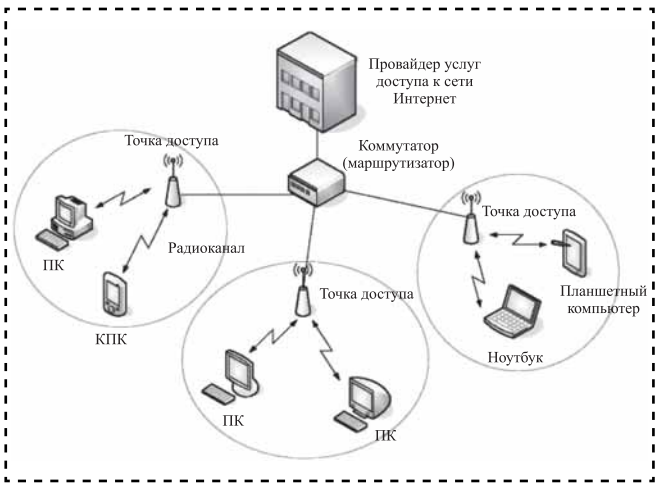


Рис. 1. Структура беспроводной сети связи

оборудование пользователей услугами связи, включающее персональный компьютер (ноутбук, нетбук, планшетный компьютер и КПК) с оборудованием доступа к беспроводной сети связи (беспроводной адаптер или интерфейс);

беспроводные точки доступа;

беспроводная среда передачи информации (радиоканал);

линии связи и оборудование провайдера услуг сети Интернет (в процессе моделирования не рассматриваются).

Среди известных показателей надежности сетей связи для оценки качества функционирования беспроводных сетей наиболее подходящими являются коэффициент готовности, вероятность безотказной работы и вероятность связности. Последний показатель применим только к сети связи определенной топологии, а в данном случае исследуется один простой сегмент сети — между пользователем и точкой доступа. В этом случае основное внимание уделяется такому показателю надежности, как коэффициент готовности.

Следует заметить, что документом регламентируется минимальное значение коэффициента готовности для сетей передачи данных, равное 0,99.

К основным отказам беспроводных сетей связи можно отнести следующие:

отказ радиоканала (беспроводной среды передачи информации) — замирание в канале, а также помехи и интерференция;

отказ аппаратного обеспечения;

отказ программного обеспечения (сбои и "зависание");

отказ вследствие целенаправленной атаки на систему.

В результате исследования возможных причин и последствий подобных видов отказов, а также оценки влияния на работу беспроводной сети связи была разработана *имитационная модель* функционирования беспроводной сети в условиях воздействия всех указанных дестабилизирующих факторов (рис. 2). Для моделирования функционирования беспроводной сети связи использовалась среда имитационного моделирования *AnyLogic*.

В качестве основных блоков имитационной модели были выбраны объекты класса *state chart* (диаграммы состояний), позволяющего задать весь процесс функционирования беспроводной сети связи в виде множества состояний системы с разными коэффициентами готовности и

переходов между состояниями, которые осуществляются с определенными вероятностями, задаваемыми статически или вычисляемыми динамически в процессе моделирования.

В качестве основных состояний системы использовались:

обычное работоспособное состояние системы "work";

атака на систему "attack";

отказ системы "fail";

замирания в канале "fading".

Состояние "work" является простым и соответствует наиболее вероятному работоспособному состоянию системы беспроводной связи, в котором коэффициент готовности $K_г$ равен единице, а пропускная способность B максимальна.

В результате воздействия внешних и внутренних дестабилизирующих факторов возможны переходы в другие состояния с определенными вероятностями (интенсивностями). Каждое из таких состояний характеризуется определенным коэффициентом готовности и пропускной способностью сети.

Из рабочего состояния возможны переходы в нерабочие состояния в случае появления замираний (*fading*), в случае атаки на систему (*attack*), а также в случае отказа беспроводной сети (*fail*).

Отказ сети представляет собой сложное состояние, состоящее из нескольких подсостояний — проблема с сетью (problem), отключение электропитания системы (power), отказ в соединении (connection), отказ оборудования (equipment), сбои в работе программного обеспечения (software).

Отказ в соединении может произойти и в случае перехода из состояний *fading* и *attack*, а из рабочего состояния возможен переход непосредственно к отказу оборудования или отказу сети.

Отказ сети логически представлен в виде появления блока "проблема с сетью", из которого уже с помощью ветвления возможны переходы к отказу оборудования, отказу в соединении, отказу питания.

Сложное состояние "отказ сети" позволяет смоделировать ситуацию с отказом питания. В этом случае возможны отказ оборудования и, как следствие, отказ в соединении. При потере питания возможно и его быстрое восстановление с последующим переходом обратно в рабочее состояние. При отказе оборудования, соответственно, отказывает и программное обеспечение.

Состояние *attack* также является сложным, состоящим из следующих подсостояний:

переходное состояние (*aggression*) представляет собой состояние перед непосредственным началом атаки, когда злоумышленник уже находится в сети, характеризуется незначительным снижением коэффициента готовности сети;

состояние "подмена устройства" (*substitution device*). Это случай неавторизированного доступа, не влечет за собой отказа сети;

состояние "перехват" (*intercept*). В случае перехвата пакетов сети часть информации может теряться, состояние также не влечет за собой отказ сети;

состояние начала модификации сети (*modification*). В случае попытки изменить структуру сети или модифицировать ее в каких-то целях (например, грабежа) система может перейти к более опасным для нее состояниям вплоть до полного отказа;

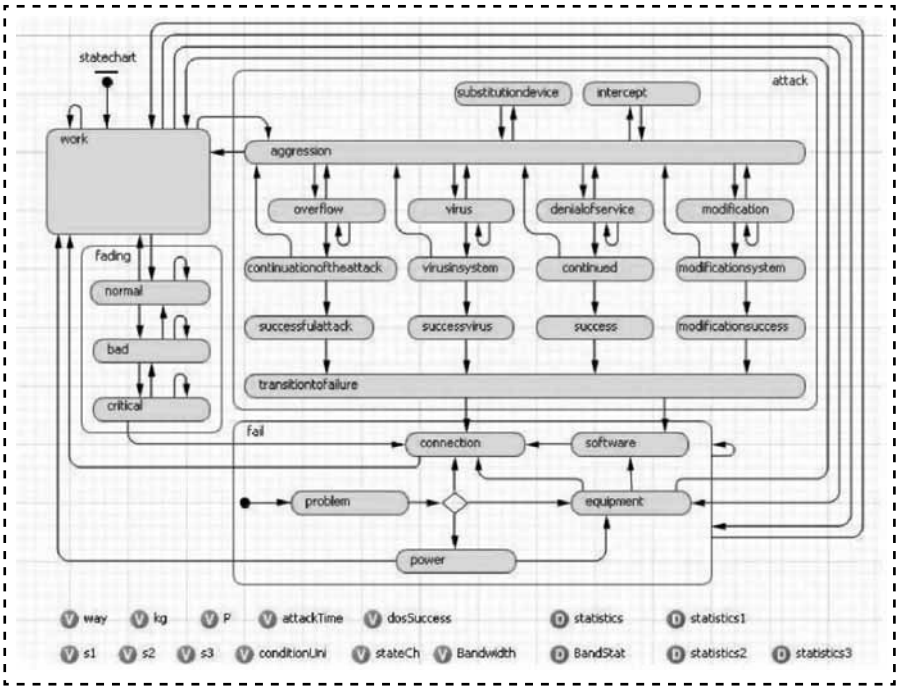


Рис. 2. Имитационная модель функционирования беспроводной сети связи в *AnyLogic*

состояние дальнейшей модификации сети (*modification system*) — произошло частичное перестроение сети;

состояние полной модификации сети (*modification success*) — сеть полностью изменена в соответствии с желаниями злоумышленника. Из этого состояния сеть переходит в неисправное состояние (либо *connection*, либо *software*);

состояние начала отказа в обслуживании (*denial of service*). Оно возникает в случае попытки лишить обслуживания абонентов сети, при переходе в менее безопасные состояния может привести к отказу в соединении либо к отказу программного обеспечения;

состояние частичного отказа в обслуживании (*continued*), когда полностью связь еще не потеряна, но наблюдается существенное снижение пропускной способности;

состояние успешной атаки, направленной на отказ в обслуживании (*success*), когда злоумышленник уже нарушил соединение. Из него система переходит в состояние отказа (либо *connection*, либо *software*);

состояние заражения системы (*virus*) — случай появления вредоносных программ; при переходе в состояния с большей степенью заражения может привести к отказу;

состояние дальнейшего заражения (*virus in system*). Антивирусная система не смогла сразу обнаружить угрозу. При этом снижается быстродействие системы;

состояние успешного внедрения вредоносных программ (*success virus*) характеризуется нарушением работы системы, вследствие чего возможна потеря соединения или отказ программного обеспечения;

состояние в случае начала атаки, направленной на переполнение системы (*overflow*). При этом большое количество пакетов начинает внедряться в сеть. При переходах в дальнейшие состояния пропускная способность может снижаться вплоть до полного отказа;

состояние дальнейшего переполнения (*continuation of the attack*). При этом число пакетов в системе уже значительно, но пока не является критичным;

состояние успешного переполнения системы (*successful attack*), когда число пакетов уже критично и далее следует переход в состояние отказа (либо *connection*, либо *software*);

переход к отказу (*transition to failure*). Является промежуточным состоянием между успешными атаками и отказом и используется для упрощения схемы.

Вероятности переходов между состояниями могут задаваться исследователем либо в виде фиксированных чисел на основе собранной на практике статистики, либо в виде более сложных аналитических моделей. Например, авторами была использована математическая модель расчета вероятности успешной *SYN-flood* атаки на основе сетей Петри—Маркова:

$$P(t) = 1 - e^{1/\tau}, \qquad (1)$$

где $P(t)$ — вероятность успешной реализации атаки от времени t; τ — среднее время перехода по всей сети Петри, в данном случае равное 1·1,15 с.

Разработанная имитационная модель может быть использована для исследования влияния различных способов структурного резервирования и методов защиты от атак на комплексные показатели надежности функционирования беспроводной сети связи, например на коэффициенты готовности $K_г$ и простоя $K_п$.

Ниже приведены результаты моделирования функционирования беспроводной сети связи при различных методах резервирования и защиты. Эти данные будут полезны далее при более тонкой настройке механизма мониторинга.

Результаты моделирования функционирования беспроводной сети связи при различных методах резервирования и защиты

Вид воздействия	$K_г$	Пропуски
Сканирование сети	1,000	1,000
Подмена устройства	0,999	0,990
Перехват пакетов	0,999	0,980
Отказ в обслуживании	0,998	0,950
Модификация сети	0,997	0,950
Вредоносные программы	0,997	0,950
Переполнение	0,997	0,950
Комплексная атака	0,995	0,900
Замирания	0,996	0,985
Атаки с учетом состояния радиоканала	0,994	0,884
Отказ элементов сети	0,997	0,994
Отказ сети с учетом всех воздействий	0,991	0,881

Для анализа конкретной WLAN переводим беспроводной адаптер в пассивный режим мониторинга (*promiscuous*). В таком состоянии сетевой адаптер будет обнаруживать все пакеты, независимо от того, кому они предназначались. Устанавливаем *CommView for WiFi*,

который и переведет адаптер в необходимый режим работы.

В качестве анализатора используем ноутбук *Sony Vaio* (*Core i7*, 6 Гб ОЗУ, Windows 8 x64) с установленным PCMCIA адаптером с увеличенной антенной, для увеличения дальности связи (рис. 3).

Анализатор сети не является ее составной частью, так как беспроводной адаптер не может одновременно слушать эфир и посылать пакеты для работы в WLAN. Конечно, можно на один из компьютеров поставить второй адаптер, который и будет следить за сетью. Тогда отпадет необходимость выделять ноутбук для поставленных целей. Но с точки зрения безопасности этого лучше не делать. Ведь, получив доступ к компьютеру нашей сети, на котором находится анализатор, злоумышленник может его просто выключить или поменять настройки. В таком случае никаких сигналов о нарушении работы сети поступать не будет, и администратор сети так и не узнает о вторжении, пока что-нибудь не перестанет работать.

В беспроводной сети каждую секунду передается множество пакетов с различной служебной, управляющей информацией, а также сами данные. Для анализа необходимо среди всего этого хаоса выбирать и анализировать только те пакеты, которые представляют интерес.

Поэтому в первую очередь мы установим "беспроводные правила" для нашей системы мониторинга. В Wi-Fi сетях фигурируют четыре вида пакетов: *beacon*, *management*, *control*, *data*. В зависимости от того, какую информацию просматривать в данной сети, выставляем захват (рис. 4) определенных видов пакетов при помощи пунктов в разделе меню "Правила", или на главной панели управления.

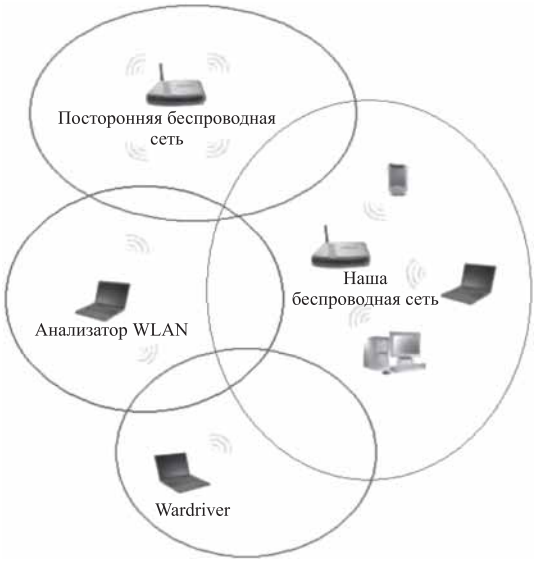


Рис. 3. Наглядная схема представленной сети

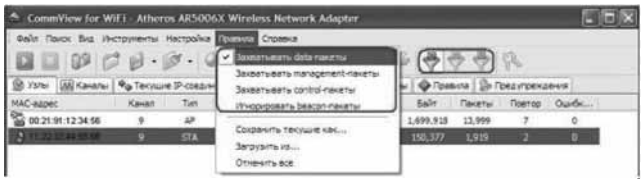


Рис. 4. Пример настройки захвата определенных видов пакетов

Data-пакеты — это данные, которые передаются по сети. Если WLAN зашифрована WEP или WPA, то и данные, передаваемые в эфир, так же будут зашифрованы и, соответственно, недоступны для посторонних. Но существует возможность следить за своей сетью, так как *CommView for WiFi* умеет расшифровывать пакеты на лету. Для этого заходим в пункт меню "Настройка" –> "Ключи WEP/WPA" и в появившемся окне вводим пароль WLAN.

Далее идут *management*-пакеты, т.е. управляющие. Они содержат фреймы *Probe Response* и *Probe Requests*, которые пересылаются между точкой доступа и клиентом для аутентификации последнего в сети.

Аутентификация по стандарту 802.11 — это только первый шаг в установке сетевого подключения. Здесь проверяется, действительно ли клиент обладает секретным ключом для работы в сети. На данном этапе шифрования данных не происходит. Если шифрование не используется, то такая аутентификация называется открытой и для работы в данной сети достаточно простого желания.

Следующим этапом установления полноценного соединения является регистрация клиента с точкой доступа, т.е. его ассоциация. Для этого используются фреймы *Association Request* и *Association Response*, которые также находятся в *management*-пакетах.

Control-пакеты тоже используются при установке соединения. Они доходят до адресата при помощи IP-адресов и содержат специальные флаги. Например, пакет с SYN-флагом означает синхронизацию (*synchronization*). Такой пакет может отправить клиент для начала соединения. В ответ он может получить подтверждение — пакет с флагом ACK (*acknowledgement*) — либо пакет с флагом RST, означающий отказ (*reset*), если

по каким-то причинам соединение невозможно. Среди возможных флагов может фигурировать FIN (*finish*), закрывающий соединение.

К последнему виду пакетов, использующихся в беспроводных сетях, относятся *beacon*-пакеты. Точка доступа с определенным интервалом времени отсылает их в эфир, чтобы находящиеся рядом клиенты могли узнать о ней. Данные пакеты содержат всю необходимую информацию о сети: ее название, мощность сигнала, наличие шифрования и т.д.

Следующей стадией фильтрации трафика являются правила, которые *CommView for WiFi* позволяет настроить достаточно гибко. Для начала рассмотрим простые правила, имеющие множество критериев отбора пакетов. Установим фильтрацию по протоколам. Для этого необходимо выполнить настройки, показанные на рис. 5.

Установлены правила, ограничивающие захват только IP, TCP и UDP пакетов. Остальные пакеты буду проигнорированы. Часть трафика отсеяна.

Теперь установим очень полезный критерий (рис. 6) на MAC-адреса. Если сеть хорошо зашифрована и все физические адреса адаптеров легальных клиентов находятся в белом списке, то при появлении устройства с неизвестным MAC-адресом необходимо зафиксировать все пакеты, которые он отправлял или получал в данной WLAN.

Все пакеты, которые будут отправлять или получать адаптеры, занесенные в список, игнорируются. А вот весь трафик, генерируемый неизвестными устройствами, будет записан.

Установка следующих видов простых правил так же легка. Если есть подозрение на какой-либо узел в сети, то можно отфильтровать пакеты, в которых фигурирует этот IP-адрес, а потом изучить действия подозрительного адреса.

Таким же образом мы поступаем и с портами, если есть подозрение, что кто-то пытается проникнуть на определенный порт сервера.

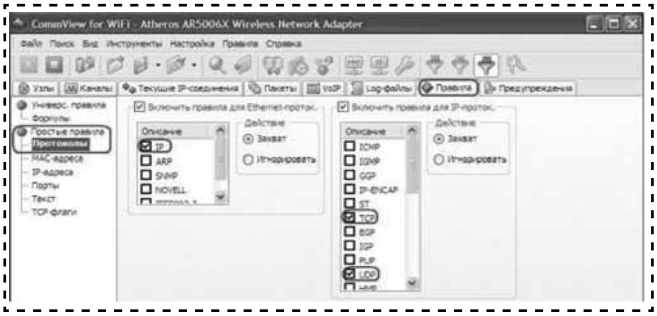


Рис. 5. Установка фильтрации по протоколам

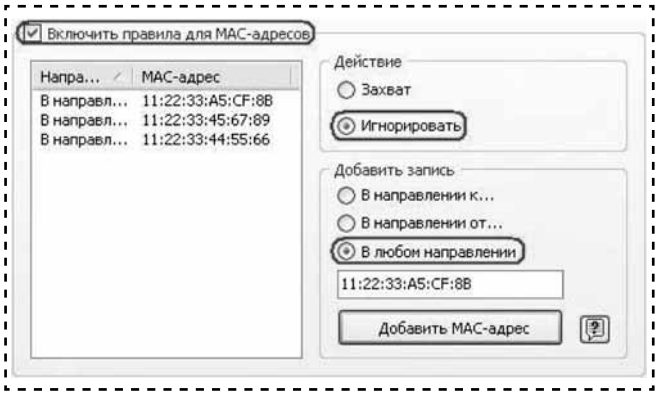


Рис. 6. Установка особых критериев MAC-адреса

Ставим правило на захват пакетов, идущих на интересующий порт.

Кроме того, есть возможность фильтровать пакеты по наличию в них определенного текста. Очевидно, что если есть свой веб-сервер, то на его порт постоянно буду приходить запросы. Не подозревать же всех. Но не каждый пакет будет содержать хитро сформированный запрос, позволяющий получить секретную информацию или повысить свои привилегии. Именно такие запросы и можно проверять в наших правилах.

Далее применяем последний вид фильтрации (рис. 7) по TCP-флагам. Вот уже огромная часть трафика, не представляющего интерес, отбрасывается. Простые правила позволяют настроить фильтрацию очень легко и быстро.

Есть возможность установить максимально гибкие правила, учитывающие многие нюансы, так называемые "Универсальные правила". Чтобы ее использовать, понадобятся знания математики и логики. Для каждого правила необходимо придумать имя и задать ему формулу, в соответствии с которой будет происходить фильтрация пакетов.

Мы создали правило *"Rule1"*. Указанная в нем формула говорит о том, что захватываться будут TCP-пакеты, размер которых лежит в диапазоне 200...600 байт, приходящие с IP-адресов в диапазоне

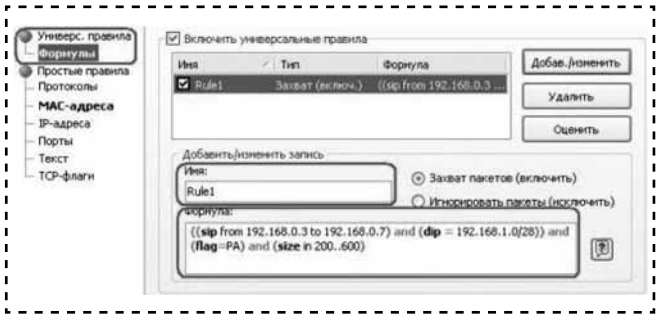


Рис. 7. Установка правил фильтрации

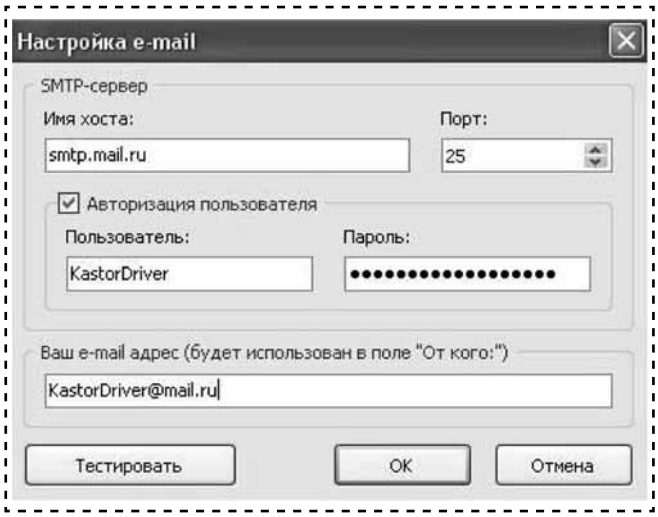


Рис. 8. Настройка системы предупреждения

192.168.0.3—192.168.0.7. Причем IP-адреса получателей находятся в сегменте 192.168.1.0/255.255.255.240 и имеют TCP-флаг PSH ACK.

Далее создадим систему предупреждений, которая будет оповещать о наличии аномалий в работе WLAN. Появится окно с настройками. Пример показан на рис. 8.

Оповещение по *e-mail* позволит получать информацию о работе сети по почте. Некоторые почтовые серверы предоставляют возможность получать *sms*-уведомления о приходе нового письма.

Завершив настройки, переходим к настройкам предупреждения, нажав кнопку "Добавить". Некоторые типы событий, при которых будет вызвано предупреждение, очень похожи на рассмотренные правила захвата, так что сориентироваться будет легко.

Сигнал может быть подан при обнаружении пакета, который подходит под указанную формулу, при превышении указанного уровня загрузки сети или при возникновении в сети устройств с неизвестными MAC или IP-адресами, а также точек доступа и одноранговых сетей.

Рассмотрим пример, показанный на рис. 9.

При появлении в эфире устройства, MAC-адрес которого не занесен в список, на экран будет выведено соответствующее сообщение. Оно также будет отправлено на указанный *e-mail*. Порог срабатывания установлен в единицу. Можно поставить и больше, если рядом с личной WLAN иногда могут проходить люди с КПК. После срабатывания предупреждения оно отключается.

В данном случае есть вероятность того, что в сеть хотят проникнуть несколько персон с разных девайсов, и мы увеличиваем это значение.

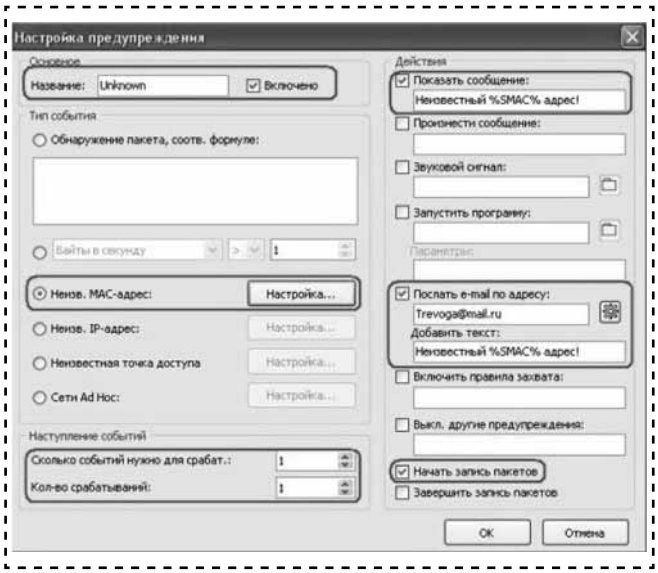


Рис. 9. Настройки сообщений

При выводе сообщения используется текст вместе с переменной % SMAC %, в которой будет записан MAC-адрес источника пакета. На рис. 10 видно, что получается, если в нашей сети появляется посторонний.

Сеть (рис. 11) зашифрована и мониторится. Также есть возможность удаленно получать данные о работе WLAN, находящейся под наблюдением.

На анализатор устанавливается *CommView Remote Agent for WiFi*. Теперь она будет служить анализатором WLAN. На удаленном компьютере устанавливается обычный CommView for WiFi, при помощи которого подключаемся к анализатору и наблюдаем перехватываемый трафик, считая его своим локальным. Установка *CommView Remote Agent for WiFi* очень проста, как и ее настройка, где необходимо будет указать порт и пароль для подключения.

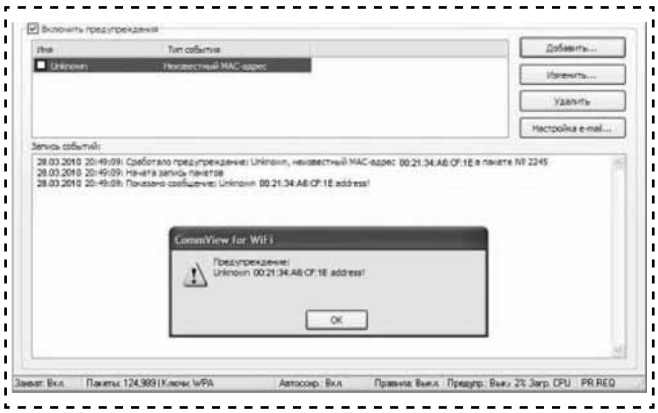


Рис. 10. Пример сообщения при возникновении постороннего

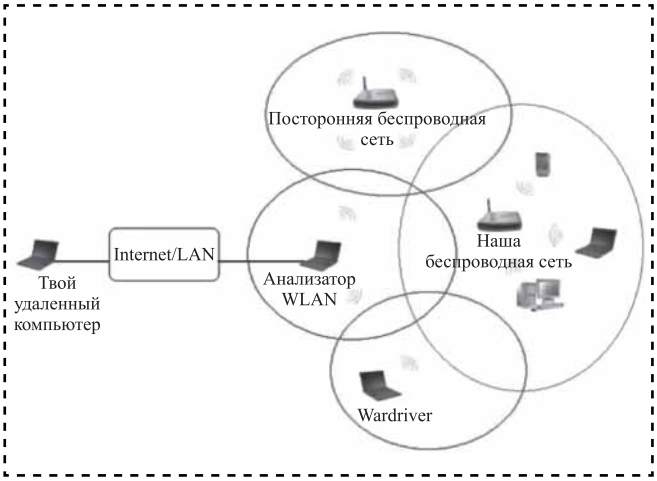


Рис. 11. Схематичное изображение сети

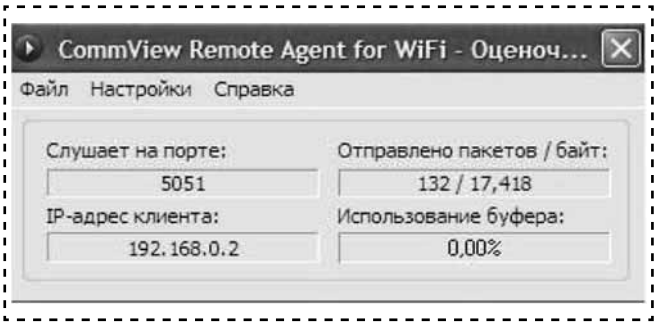


Рис. 12. Данные о соединении

Дальше эта программа будет работать в фоновом режиме. При необходимости можно просмотреть некоторые данные (рис. 12) о соединении, вызвав следующее окно.

Теперь на удаленном компьютере, запустив *CommView for WiFi*, устанавливаем новое соединение, указываем IP-адрес анализатора, канал для мониторинга и пароль для подключения. Теперь можно наблюдать за данной сетью как за локальной.

После настройки системы вряд ли ее можно назвать полноценной системой обнаружения вторжений (*Intrusion Detection Systems*). Однако она вполне может помочь защитить нашу WLAN от непрошенных гостей.

Сейчас беспроводные сети активно начинают применяться даже в маленьких городах. Поэтому построение таких систем мониторинга беспроводных сетей, возможно, будет приобретать все большее значение.

В современных сетях передача данных, которая образует стационарный трафик, сосуществует с мультимедиа трафиком, который по своей природе нестабилен, что создает дополнительные проблемы для управления с применением оконных алгоритмов.

Кроме того, мультимедийный трафик транспортируется обычно протоколом UDP, не предполагающим подтверждений доставки. Именно дейтаграммы UDP могут вызвать переполнение буфера и об этом станет известно отправителю TCP позднее, после регистрации потери сегмента.

В заключение заметим, что наиболее острым вопросом данной имитационной модели остается выбор исходных данных для моделирования, в частности математических моделей для расчета вероятностей перехода из одного состояния в другое.

По сути, от точности исходных данных будет во многом зависеть достоверность полученных результатов. В качестве исходных данных могут быть использованы результаты обработки накопленной статистики об отказах за определенный период времени, а также подобные современные аналитические модели. Причем в данной имитационной модели предусмотрена возможность отключения отдельных ветвей диаграммы состояний, что дает возможность исследовать последствия отдельных видов отказов и атак раздельно.

Библиографический список

1. **Данилевский В.В.** Технология машиностроения. М.: Высш. шк., 1988.

2. **Вишневский В.М., Портной С.Л., Шахнович И.В.** М.: Энциклопедия WiMAX. Путь к 4G.: Техносфера, 2009. 472 с.

3. **Филин Б.П.** Методы анализа структурной надежности сетей связи. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.

4. **ГОСТ Р 53111—2008.** Устойчивость функционирования сети связи общего пользования. Требования и методы проверки. М.: Стандартинформ, 2008. 16 с.

5. **Карпов Ю.** Имитационное моделирование систем. Введение в моделирование с AnyLogic. СПб.: БХВ-Петербург, 2005. 400 с.

6. **Радько Н.М., Скобелев И.О.** Риск-модели информационно-телекоммуникационных систем при реализации угроз удаленного и непосредственного доступа. М.: РадиоСофт, 2010. 232 с.

7. **Журнал** сетевых решений / LAN 07-08 1998 г. Искусство диагностики локальных сетей. М.: Открытые системы, 1998. 3 с.

8. **Мацнев Д.Н.** Разработка методов исследования протокола MAC-уровня беспроводных региональных сетей RadioEthernet. М.: Автореферат, 2004. 5 с.

9. **Воевода А.А.** О моделировании системы дистанционного контроля и управления цветной временной сетью Петри в пакете CPN Tools: инициализация модели. Новосибирск: Издательство НГТУ, 2004. С. 185—188.

УДК 658.562:621.9

Е.В. Давыдова, *канд. техн. наук,* **А.В. Дружинина, В.В. Прейс,** *д-р техн. наук*
(Тульский государственный университет)
E-mail: elen-davidova@mail.ru, preys-rabota@yandex.ru

Математическая модель производительности механического дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с параметрическими отказами

Предложена математическая модель, описывающая влияние на производительность механического дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства параметрических отказов, возникающих вследствие выхода за допустимый предел фактического времени движения предмета обработки в соответствующем интервале технологического цикла бункерного загрузочного устройства.

The mathematical model is tendered, allowing to agency on actual productivity of the mechanic disk dentate hopper feeding device of the parametric failures bound to an exit for permissible limits of an estimated time of driving of a subject of machining in an appropriate spacing of a work cycle of a hopper feeding device.

Ключевые слова: математическая модель, бункерное загрузочное устройство, производительность, параметрический отказ.

Keywords: mathematical model, hopper feeding device, productivity, parametric failures.

Дисковые зубчатые бункерные загрузочные устройства (БЗУ) используют для автоматической загрузки в технологические сборочные машины предметов обработки формы тел вращения, имеющих явно выраженное смещение центра масс вдоль продольной оси симметрии. Однако при загрузке предметов обработки, асимметричных по торцам, с неявно выраженным смещением центра масс надежность известных зубчатых БЗУ резко снижается.

В целях устранения этого недостатка авторами разработана модернизированная конструкция зубчатого БЗУ с кольцевым ориентатором по аналогии с известным механическим дисковым БЗУ, имеющим диск с радиальными пазами (гнездами) [1].

Модернизированное БЗУ, представленное на рисунке, содержит бункер, образованный обечайкой *2* и неподвижным основанием *1*, вращающийся диск *3* со сквозными гнездами *4*, чередующимися с зубьями *5* для захвата предметов обработки *8* формы тел вращения с асимметрией торцов. Торец *A* — цилиндрический, торец *B* — асимметричный (конический, ступенчатый или сферический).

На неподвижном основании *1* под вращающимся диском *3* установлен кольцевой ориентатор *6* с пазом *7*, обращенным к сквозным гнездам *4* вращающегося диска *3*, сечение которого повторяет профиль асимметричного торца предмета обработки. Ширина *b* верхней части паза не превышает диаметр цилиндрического торца *A* предмета обработки *8*.

Сечение паза *7* плавно изменяется по направлению вращения вращающегося диска *3* таким образом, что на участке кольцевого ориентатора *7*, расположенного в нижней части бункера, глубина h_{min} паза *8*, обращенного к сквозным гнездам вращающегося диска, не превышает 1/4 высоты *H* асимметричного торца *d* предмета обработки *8*, а на участке кольцевого ориентатора, расположенного в верхней части бункера, глубина h_{max} паза, обращенного к сквозным гнездам вращающегося диска, не превышает высоты *H* асимметричного торца *B* предмета обработки *8*. При этом расстояние *m* от дна паза, обращенного к сквозным гнездам, до поверхности вращающегося диска остается неизменным по всей окружности кольцевого ориентатора.

Торцовая поверхность *K* кольцевого ориентатора с пазом, обращенная к вращающемуся диску, выполнена криволинейной. Направление ее подъема совпадает с направлением вращения вращающегося диска, а угол подъема γ

торцовой поверхности *K* кольцевого ориентатора не превышает угла трения $\rho = \mathrm{arctg}\,\mu$, где μ — коэффициент трения скольжения цилиндрического торца *A* предмета обработки *8* по торцовой поверхности *K* кольцевого ориентатора.

Бункерное загрузочное устройство работает следующим образом.

При вращении диска предметы обработки, засыпанные в бункер, "ворошатся", пересыпаются и попадают в сквозные гнезда или на зубья и, поворачиваясь вокруг них, также попадают в сквозные гнезда.

Предметы обработки *8*, попавшие в сквозные гнезда вращающегося диска цилиндрическим торцом *A* вниз, опираются им на торцовую поверхность *K* кольцевого ориентатора. При дальнейшем вращении вращающегося диска предметы обработки *8*, скользя по криволинейной торцовой поверхности *K* кольцевого ориентатора, поднимаются в сквозных гнездах и в верхней части БЗУ выпадают из них под действием силы тяжести обратно в бункер.

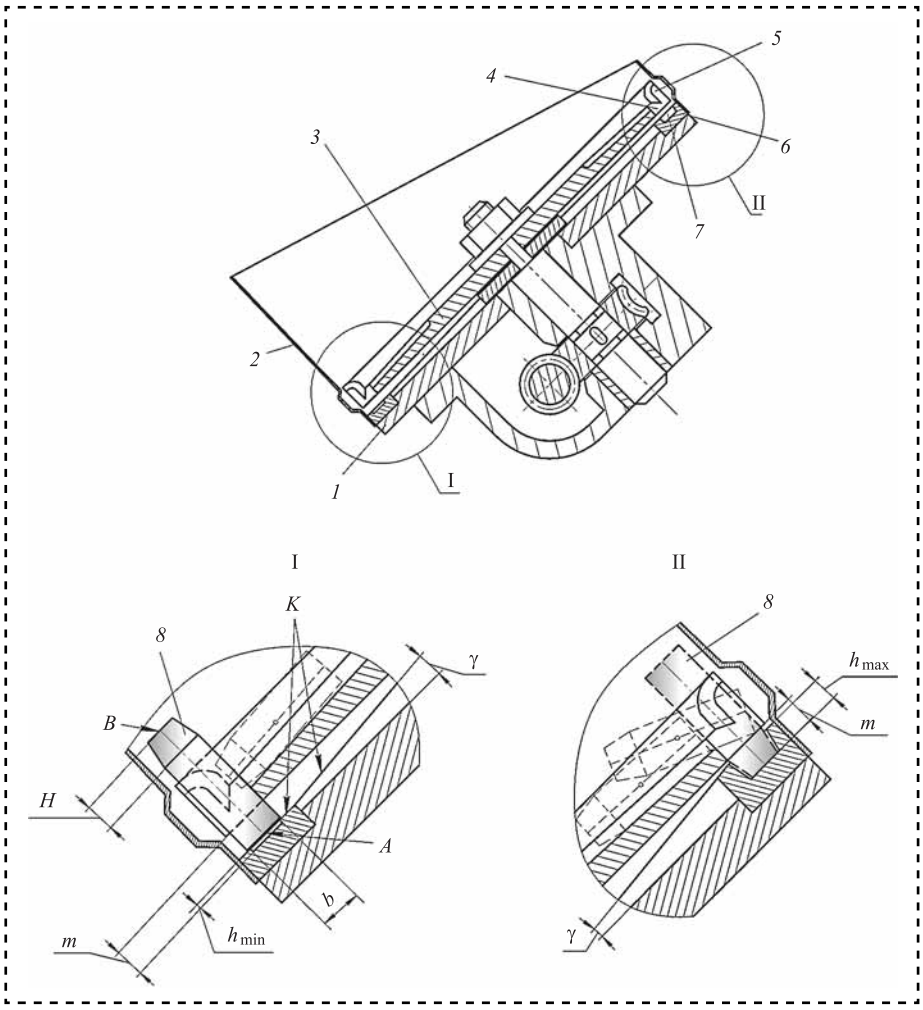
Предметы обработки *8*, попавшие в сквозные гнезда асимметричным торцом *B* вниз, опираются им на дно паза кольцевого ориентатора и надежно удерживаются в сквозных гнездах, так как расстояние *m* от дна паза до поверхности вращающегося диска остается неизменным по всей окружности кольцевого ориентатора.

При дальнейшем вращении диска предметы обработки *8*, скользя асимметричным торцом *B* по дну паза, перемещаются в верхнюю часть бункера. Так как глубина паза на участке кольцевого ориентатора, расположенного в верхней части бункера, максимальна, то предметы обработки *8* надежно удерживаются в пазу и в сквозных гнездах, перемещаются вращающимся диском в зону выдачи и выдаются из сквозных гнезд в приемник.

Таким образом, в предложенной конструкции БЗУ суммарное трение предметов обработки асимметричными торцами о внутреннюю поверхность паза существенно ниже, чем в известных конструкциях БЗУ с кольцевым ориентатором. Это обеспечивает снижение износа кольцевого ориентатора и повышение надежности модернизированного зубчатого БЗУ.

Фактическая производительность механического дискового БЗУ определяется известным выражением

$$\Pi_{ф_{БЗУ}} = 60\frac{\upsilon}{h}\eta_{max}\left(1 - \varepsilon\upsilon^4\right),$$



Модернизированная конструкция дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором:
1 — неподвижное основание; *2* — обечайка; *3* — вращающийся диск; *4* — сквозные гнезда; *5* — зубья; *6* — кольцевой ориентатор; *7* — паз; *8* — предмет обработки

где υ — окружная скорость вращающегося диска БЗУ по оси захватывающих органов (в зависимости от их конфигурации и расположения на диске); h — шаг захватывающих органов; η_{max} — наибольшее значение коэффициента выдачи, соответствующее малым скоростям захватывающих органов; ε — коэффициент, учитывающий конструктивные особенности БЗУ.

В работе [2] рассмотрен методологический подход к математическому описанию наибольшего коэффициента выдачи η_{max} и коэффициента ε для дискового БЗУ с кольцевым ориентатором.

На основе разработанного методологического подхода в работе [3] предложены математические выражения, описывающие зависимости наибольшей величины коэффициента выдачи η_{max} и коэффициента ε от физико-технических параметров загружаемых предметов обработки и конструктивных параметров механического дискового зубчатого БЗУ.

В работе [4] приведены результаты экспериментальных исследований коэффициента выдачи дискового зубчатого БЗУ, подтвердившие адекватность разработанной математической модели фактической производительности.

Однако предложенная математическая модель не отражает влияния на фактическую производительность БЗУ параметрических отказов, связанных с возможностью выхода длительности интервалов кинематического цикла БЗУ за расчетные значения.

Технологический цикл механического дискового зубчатого БЗУ (равный его кинематическому циклу) состоит из шести интервалов:

1) подготовка предметов обработки к захвату;

2) захват предметов обработки захватывающими органами;

3) пассивное ориентирование (удаление неправильно запавших предметов обработки из захватывающих органов);

4) подготовка к выдаче предметов обработки в приемник;

5) выдача предметов обработки в приемник;

6) холостой ход захватывающих органов.

Каждому интервалу цикла соответствует время, участок пути по окружности вращающегося диска БЗУ или зона интервала.

В пяти первых интервалах технологического цикла, которые назовем рабочими, происходит движение предметов обработки под действием сил тяжести и внешних сил. Время каждого рабочего интервала должно быть больше расчетного времени, необходимого для движения предметов обработки в данном интервале, поскольку в реальных условиях фактическое время движения предмета обработки под воздействием различных случайных факторов может отличаться от расчетного, например, вследствие разброса фактического значения коэффициента трения. То есть фактическое время движения предметов обработки в рабочих интервалах технологического цикла БЗУ является случайной величиной.

Для получения математического описания вероятности параметрических отказов, связанных с возможностью выхода длительности интервалов кинематического цикла БЗУ за расчетные значения, и оценки фактической производительности БЗУ с учетом этого вида отказов используем известный методологический подход, представленный в работе [5], применительно к оценке параметрических отказов роторных систем автоматической загрузки.

Условие случайного выхода времени движения предмета обработки за расчетное предельное значение $[t_p]_i$ в i-м рабочем интервале технологического цикла БЗУ запишем в виде

$$\left[t_{\text{р}}\right]_i - \left[t_{\text{т.м}}\right]_i = \Delta t_i < 0, \qquad (1)$$

где $[t_{\text{т.м}}]_i$ — фактическое значение времени движения предмета обработки в i-м интервале цикла;

Δt_i — абсолютное отклонение фактического значения времени движения от расчетного значения.

Переходя к относительным величинам, с учетом (1) получаем

$$\delta t_i = \frac{\Delta t_i}{M\left[t_{\text{т.м}}\right]_i} = \frac{\left[t_{\text{р}}\right]_i - \left[t_{\text{т.м}}\right]_i}{M\left[t_{\text{т.м}}\right]_i} < 0, \qquad (2)$$

где $M[t_{\text{т.м}}]_i$ — математическое ожидание фактического значения времени движения предмета обработки.

Введем случайные относительные отклонения величин

$$\left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_i = \frac{\left[t_{\text{т.м}}\right]_i - M\left[t_{\text{т.м}}\right]_i}{M\left[t_{\text{т.м}}\right]_i}; \qquad \left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_i = \frac{\left[t_{\text{р}}\right]_i - M\left[t_{\text{р}}\right]_i}{M\left[t_{\text{р}}\right]_i} \qquad (3)$$

и коэффициент запаса по времени движения предмета обработки $(n_t)_i$

$$(n_t)_i = \frac{M\left[t_{\text{р}}\right]_i}{M\left[t_{\text{т.м}}\right]_i}, \qquad (4)$$

где $M[t_{\text{р}}]_i$ — математическое ожидание расчетного значения времени движения предмета обработки.

С учетом выражений (3) и (4) условие возникновения параметрического отказа (2) можно записать в виде

$$\delta t_i = \left\{(n_t)_i - 1 + (n_t)_i\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_i - \left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_i\right\} < 0. \qquad (5)$$

Для $i > 1$ выражение (5) образует систему линейных уравнений, характеризующую условия возникновения параметрических отказов в любом из рабочих интервалов технологического цикла БЗУ в каком-либо захватывающем органе:

$$\begin{cases} \delta t_1 = \left\{(n_t)_1 - 1 + (n_t)_1\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_1 - \left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_1\right\} < 0; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \delta t_i = \left\{(n_t)_i - 1 + (n_t)_i\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_i - \left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_i\right\} < 0; \\ \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \\ \delta t_k = \left\{(n_t)_k - 1 + (n_t)_k\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_k - \left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_k\right\} < 0, \end{cases} \qquad (6)$$

где k — число рабочих интервалов технологического цикла БЗУ.

На практике под воздействием многочисленных случайных факторов всегда имеет место разброс $\left[t_{\text{р}}\right]_i - \left[t_{\text{т.м}}\right]_i = \Delta t_i \neq 0$, т.е. $\delta t_i \neq 0$, поэтому отклонения можно считать подчиняющимися нормальному закону распределения, а решением системы (6) будет вероятность параметрического отказа

$$q_{t_i}(\delta t_i < 0) = \\ = \frac{1}{\sqrt{2\pi(\delta t_i)}}\int_{-\infty}^{0}\exp\left\{-\frac{\left[\delta t_i - M(\delta t_i)\right]^2}{2D(\delta t_i)}\right\}d(\delta t_i), \qquad (7)$$

где $D(\delta t_i)$ — дисперсия случайной величины δt_i; $M(\delta t_i)$ — математическое ожидание величины δt_i.

Будем полагать, что максимум плотности вероятности реализуется при расчетных значениях случайных величин, т.е. для значений относительных отклонений $\left(\overline{t}_{\text{р}}\right)_i = 0$; $\left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_i = 0$. Тогда $\delta t_i = (n_t)_i - 1$, а дисперсия случайной величины δt_i имеет вид

$$D(\delta t_i) = \left(\frac{1}{3}\left[\delta t_i - M(\delta t_i)\right]_{\max}\right)^2 = \\ = \frac{1}{9}\left\{(n_t)_i\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_{\max} + \left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_{\max}\right\}^2, \qquad (8)$$

где $\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_{\max}$; $\left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_{\max}$ — известные в рассматриваемых условиях максимальные разбросы относительных отклонений $\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]$; $\left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]$, которые характеризуют соответственно точность расчетов конструктивных параметров БЗУ на этапе проектирования и размах случайных колебаний фактических значений данных параметров БЗУ в процессе его эксплуатации (например, частоты вращения диска с захватывающими органами, коэффициента трения предметов обработки и т. п.).

Введем новую переменную

$$x_i = \frac{\delta t_i - M(\delta t_i)}{D(\delta t_i)}. \qquad (9)$$

С учетом выражений (8) и (9) из формулы (7) получим

$$q_{t_i}(\delta t_i < 0) = 0,5 - \Phi(y_i), \qquad (10)$$

где

$$y_i = \frac{\delta t_i}{\sqrt{D(\delta t_i)}} = \frac{(n_t)_i - 1}{\sqrt{D(\delta t_i)}}; \qquad (11)$$

$$\Phi(y_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}}\int_0^{y_i} e^{-\frac{x_i^2}{2}}dx_i \qquad (12)$$

— табулированная функция Лапласа.

Вероятность появления параметрического отказа БЗУ из-за случайного выхода фактического значения времени движения предмета обработки за расчетное в каком-либо интервале технологического цикла БЗУ определим выражением

$$q_t = 1 - \prod_1^u\prod_{i=1}^k\left[1 - q_{t_i}(\delta t_i < 0)\right], \qquad (13)$$

где $u = \pi D/h$ — число захватывающих органов БЗУ; D — диаметр вращающегося диска БЗУ по оси захватывающих органов.

Если принять равновероятным появление параметрического отказа в любом интервале

технологического цикла БЗУ и в любом захватывающем органе, то формулу (13) можно представить в виде

$$q_t = 1 - \left(1 - q_{t_i}\right)^{uk}, \qquad (14)$$

где q_{t_i} определяется выражениями (9)—(12).

Вероятность отсутствия параметрических отказов в течение технологического цикла механического дискового зубчатого БЗУ с учетом формулы (14) и того, что число рабочих интервалов технологического цикла $k = 5$, определим по выражению

$$p_t = \left(1 - q_t\right) = \left(1 - q_{t_i}\right)^{5u}. \qquad (15)$$

В таблице приведены расчетные значения вероятности q_{t_i} параметрического отказа в одном интервале кинематического цикла БЗУ, отнесенной к одному захватывающему органу ($u = 1$; $k = 1$). Анализ приведенных в таблице вероятностей параметрического отказа q_{t_i} для значений $\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_{\max}, \left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_{\max}$, n_t, наиболее возможных в практике проектирования механических дисковых БЗУ, позволяет рекомендовать следующие выбираемые на этапе проектирования БЗУ расчетные параметры:

$$1,4 \leqslant n_t \leqslant 1,5 \text{ для } 0,03 \leqslant [\overline{t}_{\text{р}}]_{\max} \leqslant 0,05$$
$$\text{при } 0,2 \leqslant \left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_{\max} \leqslant 0,4.$$

Эти параметры обеспечивают вероятность появления параметрического отказа $q_{t_i} < 0,00055$. Например, для дискового зубчатого БЗУ с числом захватывающих гнезд $u = 68$ [3] вероятность отсутствия параметрических отказов в течение технологического цикла определяется следующим образом (см. формулу (15)): $p_t = \left(1 - 0,00055\right)^{5 \cdot 68} = 0,99945^{340} = 0,8294$.

Прогнозируемая величина фактической производительности механического дискового зубчатого БЗУ на этапе проектирования с учетом вероятности возникновения параметрических отказов (15) определится выражениями

$$\left[\Pi_{\text{ф}}\right]_{\text{БЗУ}} = 60\frac{\upsilon}{h}\eta_{\max}\left(1 - \varepsilon\upsilon^4\right)p_t =$$
$$= 60\frac{\upsilon u}{\pi D}\eta_{\max}\left(1 - \varepsilon\upsilon^4\right)\left(1 - q_{t_i}\right)^{5u}.$$

Вероятность q_{t_i} параметрического отказа в одном интервале кинематического цикла БЗУ, отнесенная к одному захватывающему органу

n_t	$\left[\overline{t}_{\text{р}}\right]_{\max}$	$\left[\overline{t}_{\text{т.м}}\right]_{\max}$		
		0,2	0,3	0,4
1,2	0,01	0,00230	0,02400	0,07210
	0,03	0,00550	0,03670	0,08380
	0,05	0,01050	0,04750	0,09680
1,3	0,01	<0,00002	0,00200	0,01460
	0,03	<0,00010	0,00400	0,02000
	0,05	0,00034	0,00680	0,02620
1,4	0,01	<0,00001	0,00007	0,00190
	0,03	<0,00001	0,00025	0,00340
	0,05	<0,00001	0,00055	0,00540
1,5	0,01	<0,00001	0,00001	0,00016
	0,03	<0,00001	0,00003	0,00040
	0,05	<0,00001	0,00003	0,00070

Таким образом, на этапе проектирования механического дискового БЗУ обеспечение требуемого уровня его надежности возможно за счет обоснованного выбора коэффициента запаса n_t по времени движения предметов обработки в рабочих интервалах технологического цикла БЗУ, который учитывает вероятностные законы рассеивания фактических значений конструктивных параметров БЗУ и физико-технических параметров загружаемых предметов обработки.

Библиографический список

1. **Давыдова Е.В., Прейс В.В.** Бункерное загрузочное устройство для деталей с неявно выраженной асимметрией торцов // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2007. № 9. С. 28—33.
2. **Давыдова Е.В., Прейс В.В.** Аналитическая модель производительности бункерного загрузочного устройства с радиальными гнездами и кольцевым ориентатором // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2009. № 11. С. 23—30.
3. **Давыдова Е.В., Дружинина А.В., Прейс В.В.** Математическая модель и оценка производительности механического зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Машиностроение и техносфера XXI века: сб. трудов XVII Междунар. науч.-техн. конф., Севастополь, 15—20 сентября 2014 г. Донецк: Изд-во ДонНТУ, 2014. С. 62—65.
4. **Дружинина А.В., Прейс В.В.** Регрессионные модели коэффициента выдачи дискового зубчатого бункерного загрузочного устройства с кольцевым ориентатором // Изв. Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 6. С. 82—87.
5. **Прейс В.В.** Модели и оценка надежности роторных систем автоматической загрузки с параметрическими отказами // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 1. С. 9—15.

621.717

М.Н. Сорокин, И.И. Колтунов, *д-ра техн. наук*
(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))
E-mail: Sorokin-mn@mail.ru

Схема комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник"

Дано построение схемы комплектования как для линейной задачи сопряжения, так и для задачи сопряжения произвольного вида. Введено понятие приведенного сопрягаемого параметра. Приведен модельный пример.

It is given creation of the scheme of matching as for a linear problem of interface, and a problem of interface of any look. The concept of the specified interfaced parameter is entered. The model example is given.

Ключевые слова: селективная сборка, задача комплектования, схема комплектования.

Keywords: selective assembly, matching problem, the scheme of matching.

В машиностроении и приборостроении селективная сборка нашла широкое применение для сборки подшипников и подшипниковых узлов. При селективной сборке подшипников решается трехпараметрическая задача комплектования, для которой имеет место линейное уравнение сопряжения с коэффициентами при сопрягаемых параметрах, равными единице:

$$y = x_1 + x_2 + x_3, \qquad (1)$$

где y — параметр сопряжения;

x_i — сопрягаемый параметр, $i = \overline{1,3}$.

В настоящее время селективная сборка стала находить применение и в других отраслях промышленности для обеспечения высокой точности выходных параметров сборочных узлов. Например, нужно обеспечить высокую точность частоты колебательного контура, которая связана с емкостью C, индуктивностью L и сопротивлением R следующим выражением:

$$f = \frac{1}{4\pi L}\left(\sqrt{R^2 + \frac{4L}{C}} - R\right). \qquad (2)$$

В общем случае уравнение сопряжения для трехпараметрической задачи комплектования имеет произвольный вид:

$$y = f\left(x_1, x_2, x_3\right). \qquad (3)$$

Для решения третьей параметрической задачи комплектования, имеющей уравнение сопряжения (1) или (3), необходимо построить схему комплектования.

Схема комплектования включает:

совокупность полей допусков сопрягаемых параметров и параметра сопряжения;

длины и число селективных интервалов, на которые разбиты поля допусков сопрягаемых параметров и параметра сопряжения;

множество допустимых путей комплектования;

количество деталей в селективных группах.

Перечисленные выше компоненты схемы комплектования позволяют осуществить постановку задачи комплектования и решить ее [1, 2].

Рассмотрим построение схемы комплектования, когда уравнение сопряжения имеет вид (1).

Введем необходимые обозначения и определения:

δx_i — поле допуска сопрягаемого параметра x_i; $\delta x_i = \left[-x_i', +x_i'\right]$, где $-x_i'$, $+x_i'$ — предельные значения сопрягаемого параметра x_i в поле допуска δx_i;

Δx_i — допуск сопрягаемого параметра x_i; $\Delta x_i = 2x_i'$;

δy — требуемое поле допуска параметра сопряжения y; $\delta y_i = \left[-y_i', +y_i'\right]$, где $-y_i'$, $+y_i'$ — предельные значения параметра сопряжения y в поле допуска δy;

Δy — допуск параметра сопряжения y; $\Delta y = 2y'$;

x_i^0 — номинальное значение сопрягаемого параметра x_i;

$x^0 = \left(x_1^0,\ x_2^0,\ x_3^0\right)$ — точка номинальных значений сопрягаемых параметров x_i;

y^0 — номинальное значение параметра сопряжения, полученное из выражений (1), (3) для точки $x^0 = \left(x_1^0,\ x_2^0,\ x_3^0\right)$;

$f_i(x_i)$ — функция распределения плотности вероятностей сопрягаемого параметра x_i, определенная на поле допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i;

$F(y)$ — функция распределения плотности вероятностей параметра сопряжения y, определенная на поле допуска δy параметра сопряжения y.

Вид уравнения сопряжения (1) не изменится, если его рассматривать в отклонениях от номинальных значений сопрягаемых параметров и параметра сопряжения.

Считаем, что отрезки δx_i, δy, функции распределения $f_i(x_i)$, $F(y)$ являются симметричными относительно номинальных значений x_i^0, y^0 сопрягаемых параметров x_i и параметра сопряжения y. Заметим, что допущение симметричности δx_i, δy, $f_i(x_i)$, $F(y)$ не оказывает влияния на основные принципы построения схемы комплектования, однако они необходимы для упрощения изложения построения схемы комплектования.

Считаем, что поля допусков δx_i сопрягаемых параметров x_i и поле допуска δy параметра сопряжения y, которые выражены в отклонениях от номинальных значений сопрягаемых параметров x_i^0 и параметра сопряжений y^0, заданы (рис. 1).

Длину селективного интервала для данной совокупности отрезков $\{\delta x_i,\ \delta y\}$ выберем следующим образом. Выберем из данной совокупности отрезок наименьшей длины. Пусть это будет отрезок δx_3.

Разобьем отрезок δx_3 на нечетное число $2N_3 + 1$ селективных интервалов длиной δ:

$$\delta = \frac{2x_3'}{2N_3 + 1}. \qquad (4)$$

Точки деления отрезка δx_3 должны быть симметричными относительно середины отрезка (см. рис. 1).

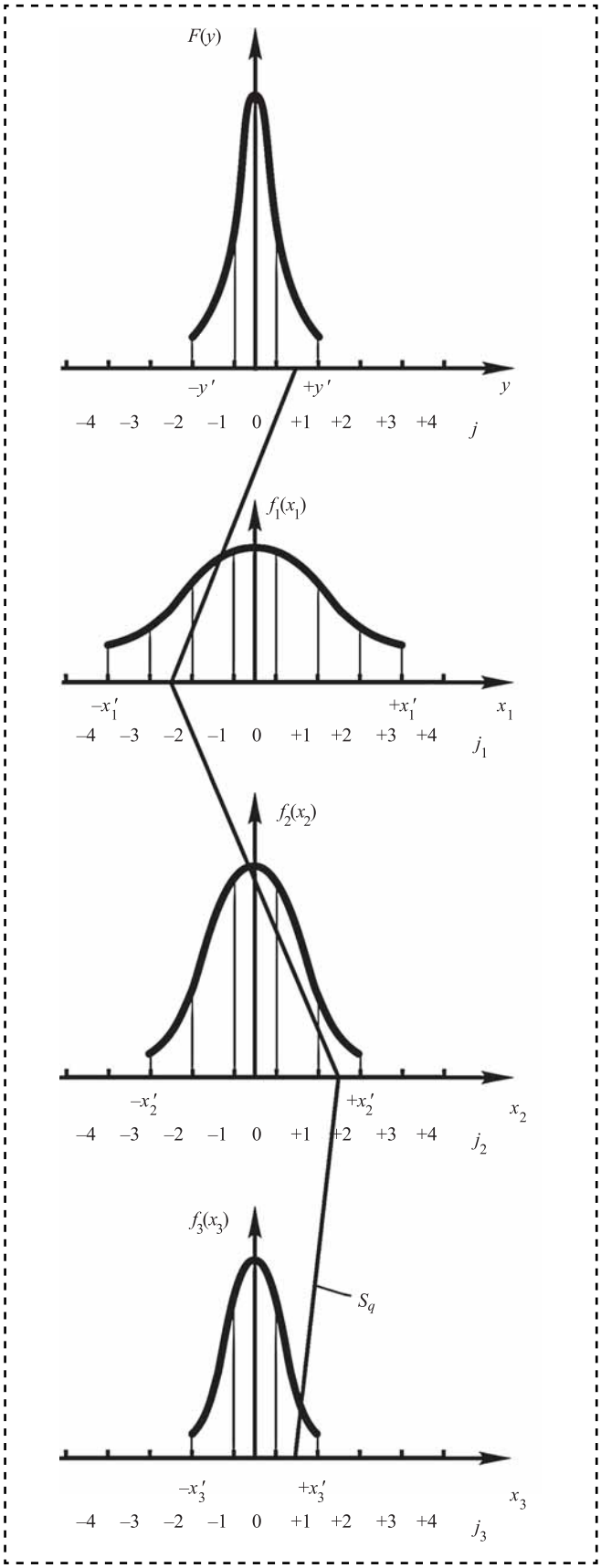


Рис. 1. Схема комплектования для линейного уравнения сопряжения

Затем селективными интервалами длиной δ покроем отрезки δx_1, δx_2 и δy. Получим N_1, N_2 и N селективных интервалов. Поля допусков сопрягаемых параметров и параметра сопряжения разбиты на нечетное число селективных интервалов равной длины. Симметричность точек деления отрезков δx_1, δx_2, δy относительно их середины должна быть соблюдена.

Обозначим значения сопрягаемых параметров x_i и параметра сопряжения y в точках деления отрезков δx_1, δy на селективные интервалы соответственно x_{ij_i}, y_j, где $i = \overline{1,3}$; $j_i = -\overline{N_i, N_i}$; $j = -\overline{N, N}$.

Индексы j_i, j указывают номера селективных интервалов сопрягаемых параметров x_i и параметра сопряжения y соответственно.

Зная длину селективного интервала δ и заданное поле допуска параметра сопряжения δy, можно записать уравнение сопряжения (1) в виде условия для получения множества допустимых путей комплектования S_q, $q = \overline{1, M}$, где M — общее число допустимых путей комплектования. Это условие, выраженное в номерах j_i селективных интервалов сопрягаемых параметров x_i, имеет вид [3]

$$j_1 + j_2 + j_3 = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots, \pm k, \qquad (5)$$

где k — предельное значение, определяющее допустимые пути комплектования. Значение k определяется требуемым полем допуска δy на параметр сопряжения y.

Обозначим через p_{ij_i} относительное количество деталей в j_i-й селективной группе i-й детали:

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

На рис. 1 представлена схема комплектования для линейного уравнения сопряжения (1).

Особенность схемы комплектования для уравнения сопряжения (1) состоит в том, что сопрягаемые параметры и параметр сопряжения имеют одинаковые размерности; при этом поля допусков сопрягаемых параметров и параметра сопряжения разбиты на нечетное число селективных интервалов равной длины.

Выбор длины селективного интервала для схемы комплектования является темой специального исследования.

Построим схему комплектования для трехпараметрической задачи комплектования при условии, что уравнение сопряжения имеет произвольный вид (3).

Построить схему комплектования для уравнения сопряжения (3) на исходных полях допусков δx_i сопрягаемых параметров x_i и на поле допуска δy параметра сопряжения y нельзя, так как они имеют разные размерности.

Введем дополнительные обозначения и определения:

y_i — приведенный сопрягаемый параметр;

δy_i — поле допуска приведенного сопрягаемого параметра y_i; $\delta y_i = [-y_i', +y_i']$, где $-y_i'$, $+y_i'$ — предельные значения приведенного сопрягаемого параметра y_i в поле допуска δy_i;

Δy_i — допуск приведенного сопрягаемого параметра y_i.

Для построения схемы комплектования для уравнения сопряжения (3) воспользуемся рисунками, которые относятся к примеру, приведенному далее в тексте статьи.

Разложим функцию (3) в ряд Тейлора в окрестности точки $x^0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0)$. Выберем линейную часть разложения и запишем ее в отклонениях от точки $x^0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0)$, сохраняя обозначения переменных x_i, y, т.е.

$$y = k_1 x_1 + k_2 x_2 + k_3 x_3, \qquad (6)$$

где $k_i = \left.\dfrac{\partial f}{\partial x_i}\right|_{x^0 = (x_1^0, x_2^0, x_3^0)}$.

Тогда уравнение сопряжения (3) заменим линейным уравнением сопряжения с коэффициентами при сопрягаемых параметрах, не равными единице (6).

Чтобы сопрягаемые параметры и параметр сопряжения в уравнении (6) имели одинаковую размерность, нужно отобразить значения сопрягаемых параметров x_i из поля допуска δx_i в значения функции y, т.е. поле допуска сопрягаемых параметров δx_i отобразить в поле значений y функции (3). Это поле значений определяет поле допуска δy_i функции (3) или поле допуска приведенного сопрягаемого параметра y_i, формируемое исходным полем допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i. Величину δy_i будем называть полем допуска приведенного сопрягаемого параметра y_i. Тогда поля допусков

δy_i приведенных сопрягаемых параметров y_i и поле допуска параметра сопряжения δy_i будут иметь одну и ту же размерность.

Операцию отображения можно записать в виде

$$y_i = k_i x_i, \tag{7}$$

где y_i — значения приведенных сопрягаемых параметров.

Уравнение сопряжения (6) с учетом выражения (7) примет вид линейного уравнения сопряжения с коэффициентами при сопрягаемых параметрах, равными единице, как и уравнение сопряжения (1):

$$y = y_1 + y_2 + y_3. \tag{8}$$

Таким образом, задача построения схемы комплектования для уравнения сопряжения (3) сведена к задаче построения схемы комплектования для уравнения сопряжения (1). Схему комплектования, построенную для уравнения сопряжения (8), назовем приведенной схемой комплектования.

Теперь имеем поля допусков δy_i приведенных спрягаемых параметров y_i и поле допуска δy параметра сопряжения y, имеющих одну и ту же размерность.

Затем последовательно определим из выражения (4) значение селективного интервала δ, значения y_{ij_i} приведенных сопрягаемых параметров y_i в точках разбиения полей допусков δy_i на селективные интервалы δ, как это было сделано для уравнения сопряжения (1). Так же получим множество допустимых путей комплектования, как это сделали для выражения (5).

Для получения относительного количества деталей в j_i-й селективной группе i-й детали p_{ij_i} для приведенной схемы комплектования сделаем следующее.

Обратным преобразованием для выражения (7) определим длину селективного интервала δ_i и значения x_{ij_i} для исходных полей допусков δx_i сопрягаемых параметров x_i:

$$\delta_i = \frac{\delta}{k_i}, \tag{9}$$

$$x_{ij_i} = \frac{y_{ij_i}}{k_i}. \tag{10}$$

При линейном преобразовании (7) функции распределения плотностей вероятностей преобразуются в функции $\overline{f}_i(y_i)$. При этом соблюдается следующее соотношение:

$$p_{ij_i} = \int_{x_{ij_i-1}}^{x_{ij_i}} f_i(x_i)\,dx_i = \int_{y_{ij_i-1}}^{y_{ij_i}} \overline{f}_i(y_i)\,dy_i, \tag{11}$$

где p_{ij_i} — относительное количество деталей в j_i-й селективной группе i-й детали.

Таким образом, определено количество деталей в селективных группах для приведенной схемы комплектования и получена приведенная схема комплектования для уравнения сопряжения (3) (рис. 2).

На рис. 3 представлена схема комплектования, где сопрягаемые параметры выражены в исходных единицах измерения. Для этой схемы комплектования длины селективных интервалов δ_i для сопрягаемых параметров x_i различны и определяются из выражения (9). Однако количество селективных интервалов, множество допустимых путей комплектования, относительное количество деталей в селективных группах как для приведенной схемы комплектования, так и для схемы комплектования с исходными полями допусков одно и то же.

Переход от исходных полей допусков δx_i сопрягаемых параметров x_i к полям допусков δy_i приведенных сопрягаемых параметров y_i можно осуществить непосредственно через функцию (3). Нужно только подставить в функцию (3) предельные значения x_i' полей допусков δx_i сопрягаемых параметров x_i и получить предельные значения y_i' полей допусков δy_i приведенных сопрягаемых параметров y_i. Для этого метода получение значений x_{ij_i} по значениям y_{ij_i} является обратной задачей для функции (3), но эта задача может быть успешно решена, используя метод половинного деления.

Предложенные два метода получения полей допусков приведенных сопрягаемых параметров практически ничем не отличаются друг от друга. Разность предельных значений для полей допусков приведенных сопрягаемых параметров, полученных этими двумя методами, является малой величиной высшего порядка, поскольку это разница между приращением функции и дифференциалом в точке.

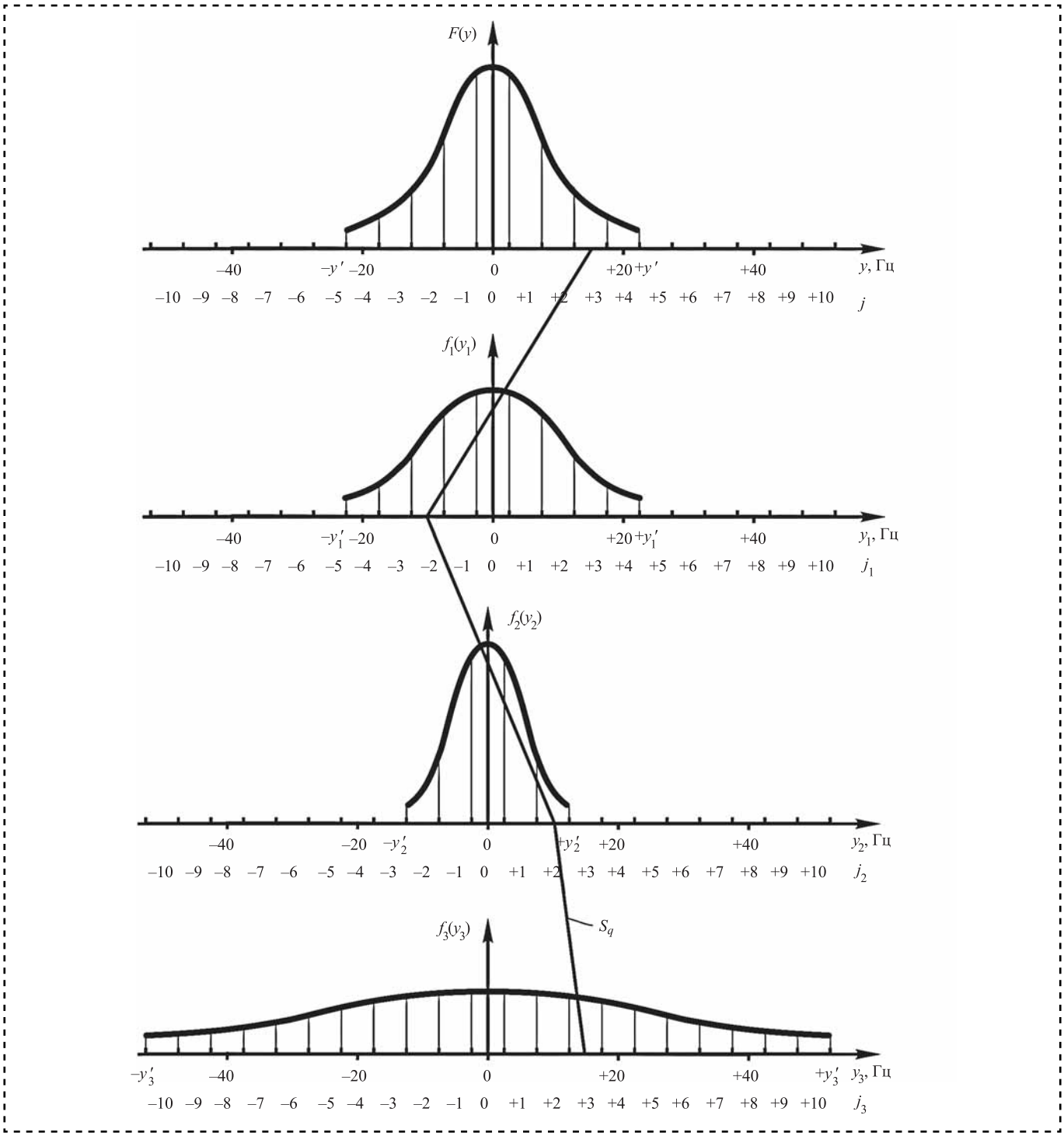


Рис. 2. Схема комплектования для полей допусков приведенных сопрягаемых параметров

Для решения трехпараметрической задачи комплектования с уравнением сопряжения (3) нужно использовать приведенную схему комплектования (см. рис. 2), однако количество деталей в селективных группах следует брать из схемы комплектования с исходными полями допусков сопрягаемых параметров (см. рис. 3).

Рассмотрим на конкретном примере построение приведенной схемы комплектования, когда уравнение сопряжения (3) имеет вид уравнения (2).

В табл. 1 представлены значения физических величин f, L, R, C в уравнении сопряжения (2) и единицы их измерения, номинальные

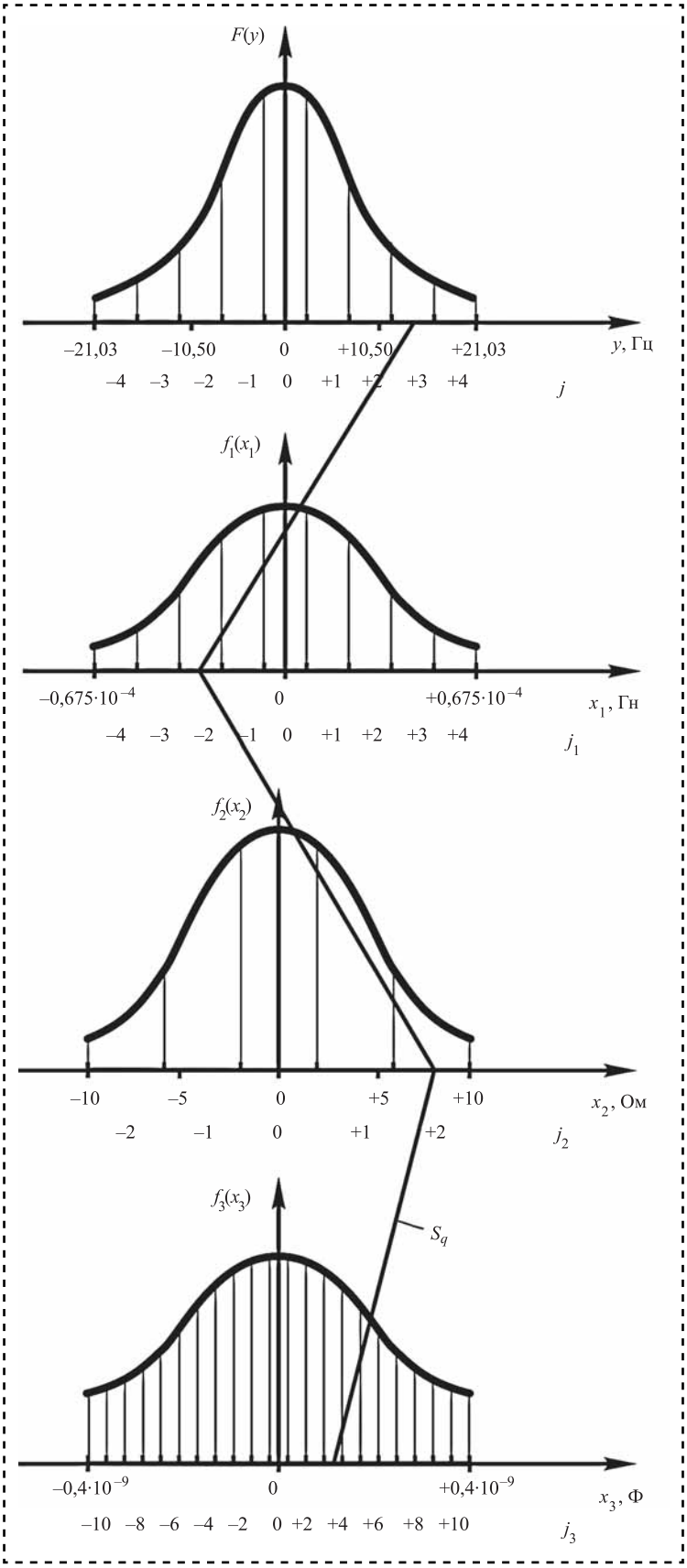


Рис. 3. Схема комплектования для исходных полей допусков сопрягаемых параметров

Таблица 1

Номинальные значения сопрягаемых параметров, параметра сопряжения и значения их допусков (%)

Частота колебательного контура *f*, Гц	$y^0 = 3823,75$	$\delta y = \pm\left(y^0 \cdot 0,5\ \%\right)$
Индуктивность *L*, Гн	$x_1^0 = 0,045$	$\delta x_1 = \pm\left(x_1^0 \cdot 1,5\ \%\right)$
Сопротивление *R*, Ом	$x_2^0 = 1000$	$\delta x_2 = \pm\left(x_2^0 \cdot 2\ \%\right)$
Емкость *C*, Ф	$x_3^0 = 20 \cdot 10^{-9}$	$\delta x_3 = \pm\left(x_3^0 \cdot 2\ \%\right)$

значения x_i^0, y^0 сопрягаемых параметров x_i и параметра сопряжения y, а также исходные поля допусков δx_i, δy сопрягаемых параметров x_i и параметра сопряжения y, выраженные в процентах.

В табл. 2 представлены значения исходных полей допусков δx_i, δy сопрягаемых параметров x_i и параметра сопряжения y, выраженные в абсолютных единицах измерения и в отклонениях, а также допуски Δx_i, Δy сопрягаемых параметров x_i и параметра сопряжения y.

В табл. 3 представлены значения частных производных k_i от функции (2) по x_i в точке номинальных значений $x^0 = \left(x_1^0, x_2^0, x_3^0\right)$, значения полей допусков δy_i, а также допусков Δy_i приведенных сопрягаемых параметров y_i.

В табл. 4 длина селективного интервала $\delta = 5$ Гц выбрана для поля допуска δy_2 приведенного сопрягаемого параметра y_2 и для полей допусков остальных приведенных сопрягаемых параметров и параметра сопряжения. Для приведенных сопрягаемых параметров y_i указано число селективных интервалов N, N_1, N_2, N_3.

Используя выражение (9), получим значения селективных интервалов δ_i для исходных полей допусков δx_i сопрягаемых параметров x_i, что также указано в табл. 4. Число селективных интервалов для исходных полей допусков δx_i сопрягаемых параметров x_i не изменилось по сравнению с числом селективных интервалов для полей допусков δy_i приведенных сопрягаемых параметров y_i. Зная для приведенной схемы комплектования длину селективного интервала δ и поле допуска

Таблица 2

Значения полей допусков, допусков сопрягаемых параметров и параметра сопряжения (в натуральных числах)

$\delta y = [-3802,72,\ +3844,77]$	$\delta y = [-21,03,\ +21,03]$	$\Delta y = 42,06$
$\delta x_1 = [0,0044325,\ 0,045675]$	$\delta x_1 = [-0,675 \cdot 10^{-9},\ +0,675 \cdot 10^{-9}]$	$\Delta x_1 = 0,0013$
$\delta x_2 = [990,\ 1010]$	$\delta x_2 = [-10,\ +10]$	$\Delta x_2 = 20$
$\delta x_3 = [19,6 \cdot 10^{-9},\ 20,4 \cdot 10^{-9}]$	$\delta x_3 = [-0,4 \cdot 10^{-9},\ +0,4 \cdot 10^{-9}]$	$\Delta x_3 = 0,8 \cdot 10^{-9}$

Таблица 3

Значения частных производных, полей допусков и допусков сопрягаемых параметров, выраженные в единицах измерения параметра сопряжения

Частные производные k_i	$\delta y = [-21,03,\ +21,03]$	$\delta y = [-21,03,\ +21,03]$	$\Delta y = 42,06$
$k_1 = -29050,7279$	$\delta y_1 = [+19,61,\ -19,61]$	$\delta \bar{y}_1 = [+19,44,\ -19,98]$	$\Delta y_1 = 30,22$
$k_2 = -1,2092$	$\delta y_2 = [+12,09,\ -12,09]$	$\delta \bar{y}_2 = [+12,07,\ -12,12]$	$\Delta y_2 = 24,18$
$k_3 = +1,2582$	$\delta y_3 = [-50,33,\ +50,33]$	$\delta \bar{y}_3 = [-51,56,\ +51,12]$	$\Delta y_3 = 100,66$

Таблица 4

Длины и число селективных интервалов

$\delta = 5$ Гц	$N = 9$	$\delta = 5$ Гц
$\delta = 5$ Гц	$N_1 = 9$	$\delta_1 = 1,5 \cdot 10^{-4}$ Н
$\delta = 5$ Гц	$N_2 = 5$	$\delta_2 = 2$ Ом
$\delta = 5$ Гц	$N_3 = 21$	$\delta_3 = 0,38 \cdot 10^{-1}$ *F*

δy параметра сопряжения y, можно записать уравнение сопряжение как условие получения допустимых путей комплектования следующим образом:

$$j_1 + j_2 + j_3 = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3.$$

Относительное количество деталей в селективных группах как для приведенной схемы комплектования, так и для схемы комплектования с исходными полями допусков является одним и тем же и может быть определено из выражения (11) с учетом выражения (10).

На рис. 2 представлена приведенная схема комплектования для данного примера, а на рис. 3 — схема комплектования для исходных полей допусков сопрягаемых параметров.

Зная допустимые пути комплектования и количество деталей в селективных группах, можно решить задачу комплектования методом перераспределения потока [2].

В табл. 3 (столбец 3) представлены поля допусков $\delta \bar{y}_i$ приведенных сопрягаемых параметров y_i, полученные при их вычислении с использованием выражения (2). Видно, что предельные значения полей допусков приведенных сопрягаемых параметров для двух рассмотренных методов практически совпадают.

Выводы

1. Построена схема комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" для линейного уравнения сопряжения.

2. Построены приведенная схема комплектования и схема комплектования для исходных полей допусков сопрягаемых параметров при селективной сборке изделий типа "подшипник" для уравнения сопряжения произвольного вида.

3. Показано, что предложенные методы построения приведенной схемы комплектования (метод, основанный на линеаризации уравнения сопряжения произвольного вида, и метод, основанный на вычислениях значений приведенных сопрягаемых параметров с использованием уравнения сопряжения произвольного вида) являются идентичными и практически ничем не отличаются друг от друга.

Библиографический список

1. **Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А., Урманова Д.И.** Математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 3. С. 40—43.

2. **Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А.** Метод перераспределения потока для решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 9. С. 7—13.

3. **Сазонов Д.А.** Структура множества путей комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 34—38.

УДК 621.91.1

В.Ф. Макаров, *д-р техн. наук,* **Г.Д. Петухов**
(Пермский научно-исследовательский политехнический университет)
E-mail: makarovv@pstu.ru, el190980@yandex.ru

Разработка сборных конструкций протяжного инструмента для скоростного протягивания хвостовиков лопаток компрессора из труднообрабатываемого материала

Проведен анализ состояния и проблемы протягивания лопаток компрессоров в России и за рубежом. Рассмотрены нагрузки, которые испытывает режущая пластина при работе. Произведен подбор режущих пластин из каталога "Sandvik" для обработки титана и жаропрочных сталей с учетом действующих сил.

Analyses the status and problems of broaching blades of compressors in Russia and abroad. Considered burden felt by cutting plate at work. Made a selection of cutting plates from the directory "Sandvik" for titanium and heat-resistant steels taking into account the existing forces.

Ключевые слова: протягивание, нагрузка, лопатка, действующая сила, режущая пластина, титан, жаропрочный сплав.

Keywords: routing, load, shovel, active force, cutting plate, titanium, heat-resistant alloy.

В современном машиностроении процесс протягивания является высокопроизводительным методом обработки металла резанием в целях получения высокого качества обрабатываемой поверхности.

По трудоемкости протягивание превосходит такие виды обработки, как фрезерование и шлифование. Получаемый параметр шероховатости составляет $Ra \leqslant 1{,}25$, допуск размера — $\Delta = 0{,}02$ мм, отклонение прямолинейности по углу — не более 5′. Однако главной проблемой протягивания является применение протяжек из быстрорежущей стали при ограниченных скоростях резания ($v \approx 1{,}5...2$ м/мин).

Анализ литературных данных показывает, что этому вопросу уделяется недостаточное внимание. Как правило, исследования носят несистемный характер и касаются либо анализа износоустойчивости инструментов, либо определения свойств обработанного поверхностного слоя отдельных представителей обрабатываемых материалов, либо совершенствования конструкций протяжек и протяжных станков. Недостаточно изучены также вопросы влияния режимов резания на силы резания и характер вызываемых ими технологических напряжений в обрабатываемых деталях.

Применяемые методы и разработанные методики весьма трудоемки. Некоторые исследователи рекомендуют применять при протягивании низкие скорости резания (до 3 м/мин) при использовании как быстрорежущих, так и твердосплавных протяжек.

В то же время Н.И. Жигалко, Н.И. Ковзель, Н.Ф. Пронкин, В.И. Белашков, А.Е. Вишняков, В.Ф. Скиженок, П.Г. Кацев рекомендуют для труднообрабатываемых материалов использовать повышенные (до 30...50 м/мин) скорости протягивания как быстрорежущими, так и твердосплавными протяжками. Большинство работ было выполнено в лабораторных условиях, на образцах обрабатываемых материалов, на станках-стендах. Приведенные там рекомендации не учитывают конкретные производственные и технические условия, размеры и конфигурацию обрабатываемых деталей, мощность и жесткость применяемого оборудования и т.д.

В ОАО "ПМЗ" для протягивания лопаток компрессора были модернизированы протяжные станки (рис. 1), что позволило увеличить скорость резания до 26...30 м/мин при обработке лопаток из труднообрабатываемых сплавов ВТ-8М, ХН35ВТЮ, ВЖЛ-14 [1]. Модернизация станков проведена за счет изготовления

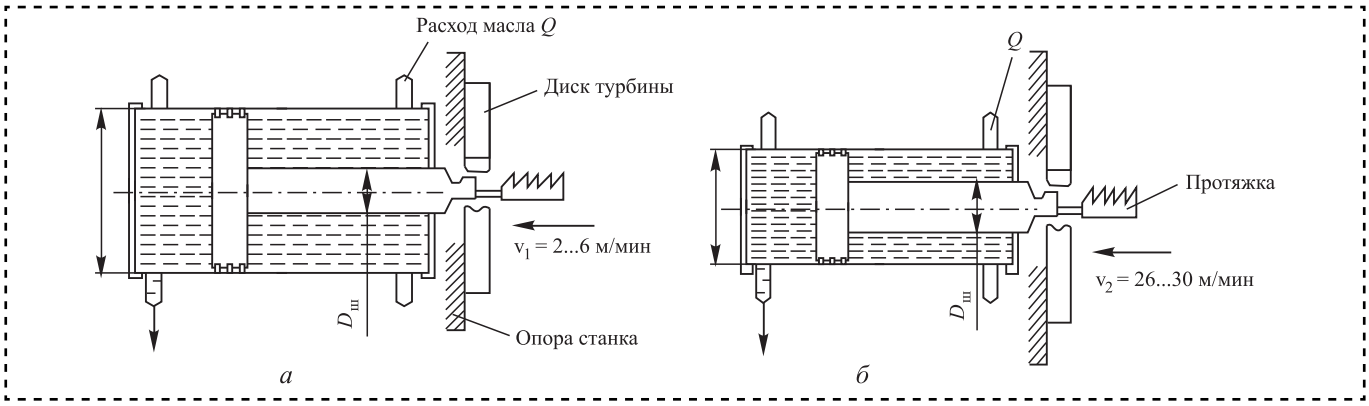


Рис. 1. Схема модернизации гидропривода протяжного станка за счет уменьшения диаметра гидроцилиндра $D_ц$ и сохранения диаметра штока $D_ш$:
а — до модернизации; *б* — после модернизации

нового гидроцилиндра и нового поршня с уменьшенными диаметрами и с прежним диаметром штока $D_ш$.

В результате модернизации обеспечивается стабильная работа протяжных станков в диапазоне скоростей до 30 м/мин в течение длительного времени. При этом тяговое усилие $P_{тяг}$ модернизированных станков снижается в 1,5—2 раза (табл. 1). Этого усилия вполне достаточно для обработки замковых соединений дисков и лопаток компрессора из различных сталей и сплавов.

При выборе рациональной марки твердого сплава для напайных протяжек были проведены предварительные испытания твердых сплавов марок ВК8, ВК6М, ВК10-ОМ, Т5К10 и Т15К6 на изгибную прочность, интенсивность адгезионного взаимодействия с обрабатываемыми материалами, величину износа и выкрашивания режущих кромок (рис. 2).

Анализ результатов стойкостных испытаний показал, что из рассмотренных твердых сплавов наибольшую стойкость имеют сплавы ВК10-ОМ и ВК8. Причем сплав ВК10-ОМ выкрашивался раньше, чем сплав ВК8, поэтому выбран твердый сплав марки ВК8 для протягивания.

При рассмотрении вопросов трения и износа режущих инструментов необходимо иметь представление о прочностных и пластических изменениях в контактных слоях трущихся пар. Последнее в значительной степени зависит от температуры этих слоев. Общей закономерностью для всех испытанных сталей и сплавов является снижение прочностных свойств с увеличением температуры испытаний.

Определение оптимальных режимов протягивания этим сплавом проводилось согласно теории профессора А.Д. Макарова. Для этого проведен анализ влияния температуры T при обработке на механические свойства титановых сплавов (рис. 3).

Установлено резкое снижение прочности у титановых сплавов на примере ВТ3-1 и ВТ18У. При увеличении температуры испытания до 800...850 К предел прочности снижа-

Таблица 1

Технические данные по модернизации протяжных станков

Модель протяжного станка	До модернизации			После модернизации		
	$D_ц$, мм	$P_{тяг}$, кН	v_{max}, м/мин	$D_ц$, мм	$P_{тяг}$, кН	v_{max}, м/мин
7А540	300	400	**6**	200	140	**30**
7А520	200	200	**11**	150	90	**30**
774	125	50	**11**	98	40	**30**
7Б74	125	50	**11**	98	40	**30**

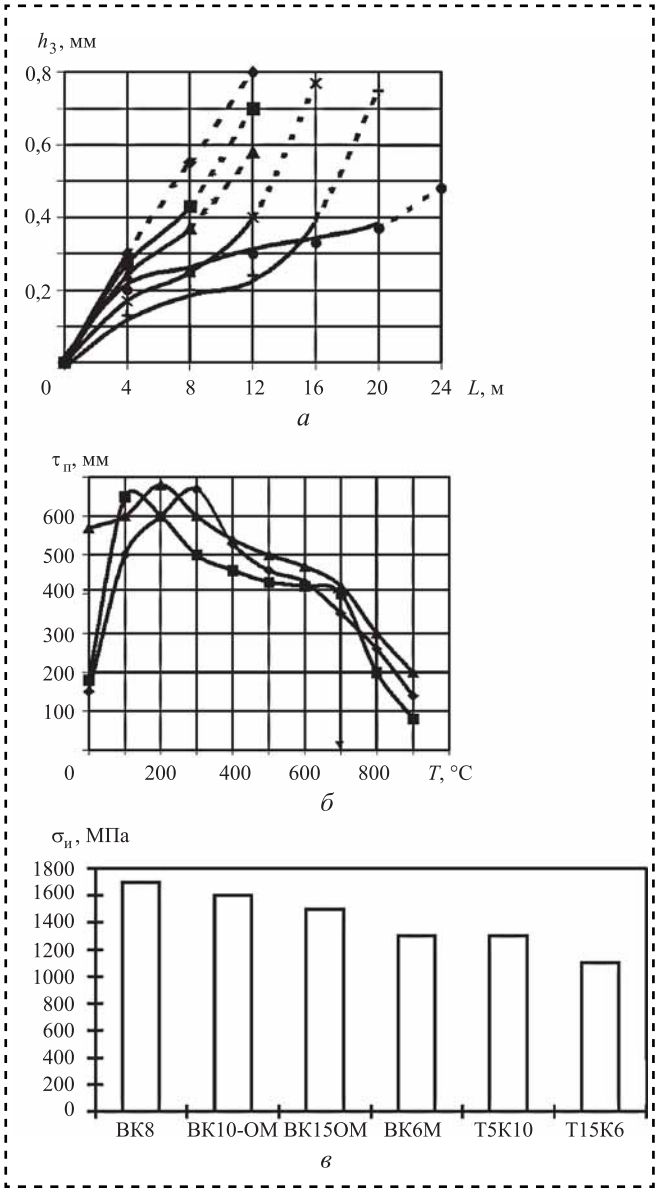


Рис. 2. Результаты сравнительных исследований различных марок твердых сплавов:
а — по износостойкости (—✦— — Т15К6, —■— — Т5К10, —▲— — ВК6М, —✕— — ВК6ОМ, —+— — ВК10-ОМ, —●— — ВК8); *б* — по адгезии к обрабатываемому материалу (—✦— — ВК10-ОМ, —■— — ВК8, —▲— — Т15К6); *в* — по прочности на изгиб

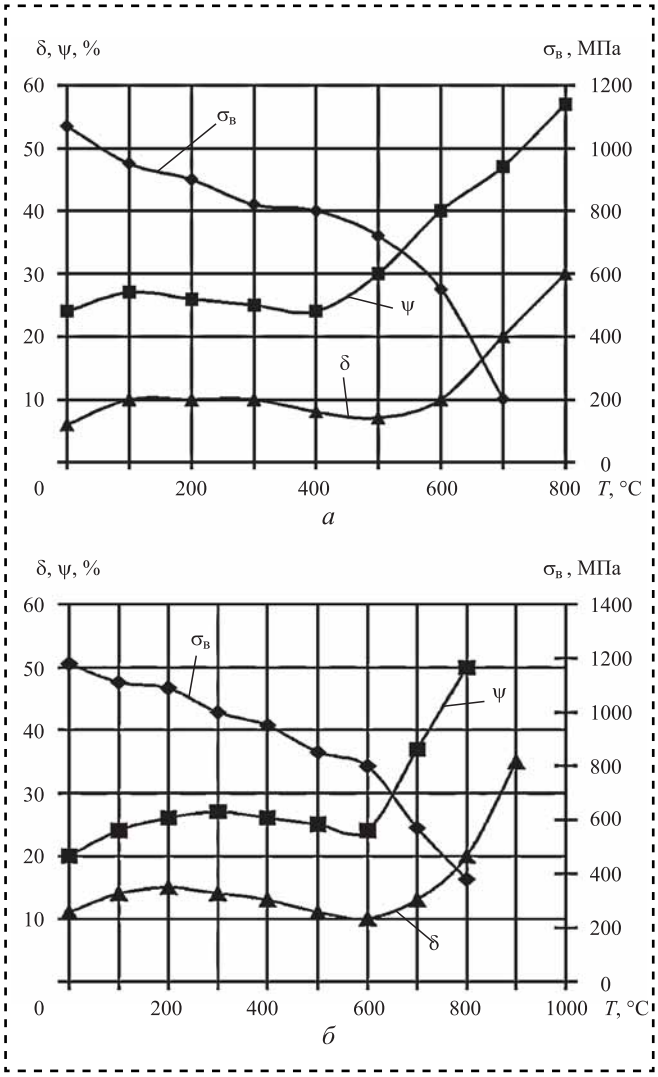


Рис. 3. Влияние температуры механических испытаний *T* на прочностные ($\sigma_в$) и пластические (δ, ψ) свойства титановых сплавов ВТ3-1 (*а*) и ВТ18У (*б*)

ется с 1000...1100 МПа до 500...800 МПа (особенно резко для сплавов ВТ3-1 и ВТ8М), т.е. в 1,2—2 раза. К тому же у титановых сплавов зона провала пластичности выражена наименее интенсивно.

В результате обработки результатов экспериментальных исследований установлено, что при протягивании жаропрочных сталей и сплавов различных марок характер изменения средней температуры резания от скорости резания $T = f(v)$ имеет определенную закономерность. В диапазоне малых скоростей резания v температура резания *T* резко возрастает, а при дальнейшем увеличении скорости резания наблюдается замедление интенсивности роста температуры.

По результатам измерения температуры резания и износа протяжек строились совмещенные зависимости интенсивности износа $h_{о.з.л}$ и температуры резания *T* от скорости протягивания (резания) v для титановых сплавов.

Из рис. 4 видно, что наименьшая интенсивность износа $h_{о.з.л}$ проявляется при оптимальной температуре резания *T*, совпадающей с температурой провала пластичности для

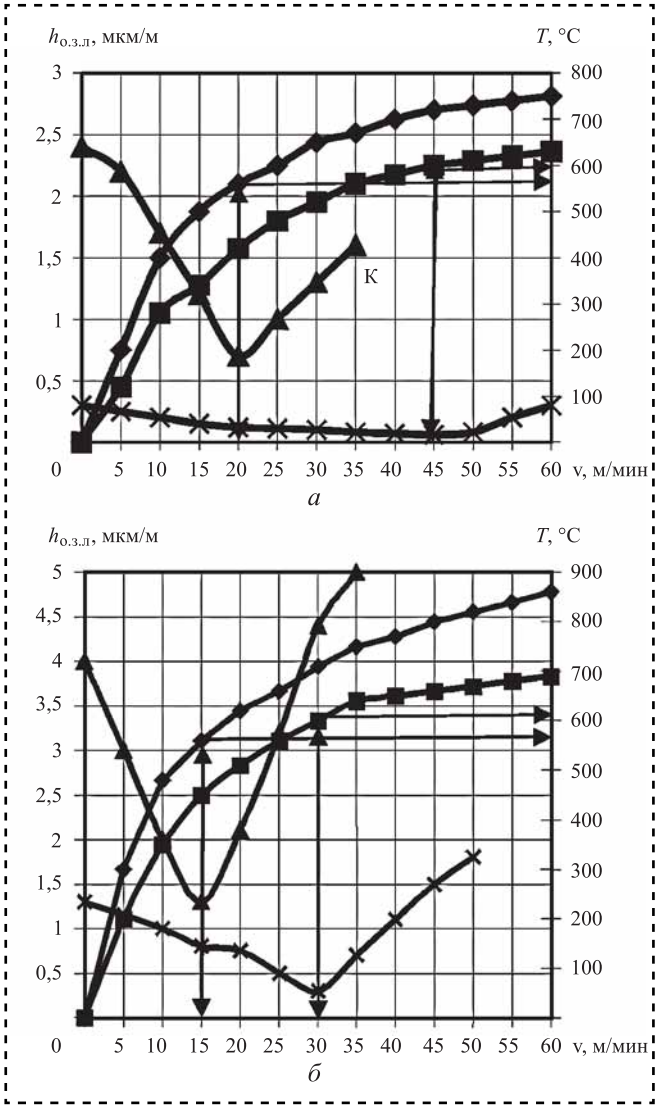


Рис. 4. Влияние скорости резания v на изменение температуры резания *T* и интенсивность износа $h_{о.з.л}$ при протягивании титановых сплавов ВТ3-1 (α + β)-фаза (*а*) и ВТ18У α-фаза (*б*) при S_z = 0,02 мм/зуб:
$h_{о.з.л}$ (Р18), $h_{о.з.л}$ (ВК8), *T*, °C (Р18), *T*, °C (ВК8)

данного титанового сплава. Скорость резания при этом является оптимальной.

Из табл. 2 видно, что с увеличением скорости резания v силы резания P_z и P_y понижаются. С повышением подачи *S* силы резания P_z и P_y увеличиваются.

В данный момент в отечественной и зарубежной промышленности при обработке жаропрочных и титановых сплавов (ВТ8, ВТ3-1, ХН35ВТЮ, ВЖЛ-14 и их аналогов) используются в основном протяжки из быстрорежущей стали, а также протяжки с напайными твердосплавными пластинами.

В то же время при точении, фрезеровании, сверлении широко применяются сборные режущие инструменты с неперетачиваемыми пластинами. Современный уровень сменных твердосплавных пластин позволяет более гибко подбирать режимы резания, увеличивать скорость резания при обработке лопаток компрессора из титана и жаропрочных сплавов. Решением этих проблем является применение сборных протяжек со сменными твердосплавными пластинами. Предлагаемые варианты имеют свои достоинства и недостатки.

Протяжки из быстрорежущей стали (v = 1,5...2 м/мин)

Достоинства: наиболее простые, дешевле в изготовлении по сравнению с другими типами протяжек.

Недостатки: ограниченная скорость резания. Износ одного зуба приводит к перезаточке

Таблица 2

Изменение сил резания P_z и P_y при протягивании

Подача *S*, мм/зуб	Сплав ВТ8М				Сплав ХН35ВТЮ			
	P_z, Н/мм		P_y, Н/мм		P_z, Н/мм		P_y, Н/мм	
	При скорости резания v, м/мин							
	1,5	30	1,5	30	1,5	30	1,5	30
0,02	274	226	240	214	511	279	349	186
0,10	500	280	440	247	800	620	740	320

всех зубьев или забраковке всей протяжки. Наличие остаточных напряжений и прижогов при переточке зубьев. Ухудшение условий заполнения впадины зуба стружкой после переточек. Низкая стойкость.

Протяжки с напайными твердосплавными пластинами (v = 25 м/мин и более)

Достоинства: позволяет увеличить скорость резания. Позволяет обрабатывать труднообрабатываемые сплавы. Стойкость выше быстрорежущих в 10—15 раз.

Недостатки: износ и выкрашивание одного зуба приводят к перезаточке всех зубьев или забраковке всей протяжки. Сложность и дороговизна изготовления. Ухудшение условий заполнения впадины зуба стружкой после переточек. Наличие остаточных напряжений в пластинах после пайки и переточки зубьев. Неравномерная заточка зубьев для исключения выкрашивания приводит к изменению перепадов с зуба на зуб, т.е. подачи. Требуется участок заточки, высокая квалификация заточников, качественные абразивные круги, высокоточное оборудование.

Сборные протяжки со сменными блоками (v = 25 м/мин и более)

Достоинства: износ зуба требует замены не всей протяжки, а только блока зубьев. Позволяет увеличить скорость резания. Позволяет обрабатывать труднообрабатываемые сплавы.

Недостатки: дороговизна и сложность изготовления. Увеличивает номенклатуру специального инструмента. Элементы протяжки не взаимозаменяемы, требуется специальное оснащение только от завода-изготовителя. Доставка заказных элементов требует много времени (до месяца и более).

Сборные протяжки со сменными твердосплавными пластинами (v = 25 м/мин и более)

Достоинства: износ и выкрашивание кромки зуба требуют замены не всей протяжки, а только пластины (или нужна переустановка, так как пластина имеет 8 рабочих граней). Позволяет увеличить скорость резания, обрабатывать труднообрабатываемые сплавы (сменные твердосплавные пластины широко доступны, взаимозаменяемы, можно иметь несколько поставщиков), постоянно совершенствовать процесс протягивания за счет подбора и внедрения более современных режущих пластин (улучшенный сплав, улучшенное покрытие и т.д.). Не требует заточки и переточки пластин, что исключает наличие остаточных напряжений. Обеспечивает равномерность подачи на зуб. Многоразовое использование корпуса протяжки.

Недостатки: дороговизна и сложность изготовления самой протяжки. Требует высокой точности обработки впадин под пластины.

Таким образом, одним из путей повышения эффективности финишной механической обработки деталей ГТД является применение скоростного протягивания сборными протяжками со сменными твердосплавными пластинами.

Анализ разрабатываемых конструкций сборных протяжек показал, что применение протяжек с горизонтально-расположенными сменными твердосплавными пластинами вызывает ряд замечаний:

передняя и задняя поверхности режущей кромки пластины функционально меняются местами;

покупные позитивные пластины имеют стандартизированный задний угол α = 7...11°, в связи с этим возникают проблемы с получением нужного переднего угла γ;

получение стружки нужных форм и размеров за счет правильного выбора типа стружечной канавки невозможно, поскольку пластина будет работать задней поверхностью, на которой нет радиусной стружкообразующей канавки.

Однако требуемый передний угол γ можно получить путем соответствующего наклона посадочного места в протяжке под пластину.

Для назначения рациональных геометрических параметров необходимо провести моделирование и расчет конструкции протяжки.

Моделирование нагрузок, действующих на режущие кромки протяжки

Геометрические параметры режущего инструмента оказывают существенное влияние на усилие резания, качество поверхности и

износ инструмента. Так, с увеличением угла γ инструмент легче врезается в материал, снижаются силы резания, улучшается качество поверхности, но повышается износ инструмента. Наличие угла α снижает трение инструмента о поверхность резания, уменьшая его износ, но чрезмерное увеличение α ослабляет режущую кромку, способствуя ее разрушению при ударных нагрузках.

Сила резания P представляет собой силу сопротивления резания, действующую на режущий инструмент в процессе упругопластической деформации и разрушения срезаемой стружки.

За точку приложения силы резания считают вершину лезвия или некоторую точку режущей кромки. Эту силу раскладывают по координатным осям прямоугольной системы координат xyz.

В этой системе координат ось z направлена по скорости главного движения, и ее положительное направление соответствует направлению действия обрабатываемого материала на инструмент.

Ось y направлена по радиусу окружности главного движения вершины. Ее положительное направление также соответствует направлению действия металла на инструмент.

Направление оси x выбирается из условия образования правой системы координат. Значение усилия резания определяется несколькими факторами. Оно растет с увеличением глубины h резания и подачи S (сечения срезаемой стружки), скорости резания v, с уменьшением переднего угла γ режущего инструмента. Поэтому расчет усилия резания производится по эмпирическим формулам, установленным для каждого способа обработки (см. справочники по обработке резанием). Например, для строгания такая формула имеет вид

$$P = C_p x_p S Y_p X^n,$$

где коэффициенты C_p, x_p, Y_p, X^n характеризуют материал заготовки, резца и вид обработки.

Мощность процесса резания определяется скалярным произведением:

$$N = P_z \mathrm{v}, \qquad (1)$$

где P_z — сила резания в оси z;

v — скорость резания, м/мин.

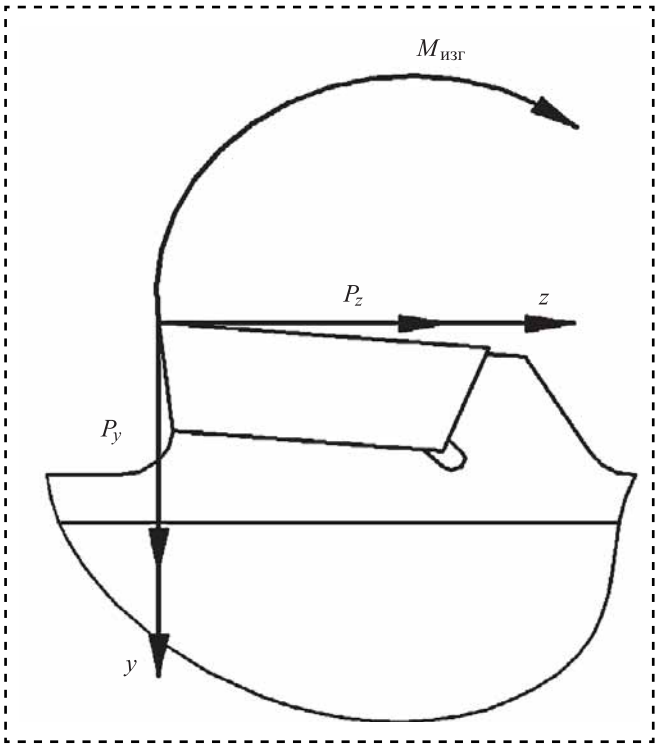


Рис. 5. Распределение нагрузки на кромку режущей пластины при протягивании

На рис. 5 рассмотрена схема распределения нагрузки на кромку режущей пластины. В данном случае сила действует по осям y, z и существует изгибающий момент $M_{изг}$.

С учетом моделирования и испытания жесткости крепления сборных резцов выбираем пластины для титана ВТ3-1, ВТ8 и для жаропрочных сталей ХН35ВТЮ и ВЖЛ 14.

Для точения жаропрочных сталей типа ХН35ВТЮ и ВЖЛ 14 выбираем квадратные пластины фирмы Sandvik для получистовой обработки SNMG 120408-XM (код сплава GC15). Другой вариант — это применение квадратных пластин SNMG 120412-SMC (код сплава 1115), оптимизированных для подачи СОЖ под высоким давлением. Но существенным недостатком этих пластин является то, что они не имеют задних углов. При закупке данных пластин необходимо будет затачивать задний угол перед установкой их на протяжку, что нерационально.

Поэтому оптимальным решением этой проблемы является квадратная пластина Sandvik SCMT 09 T3 08-SMC (код сплава 1115) для получистовой обработки с подачей СОЖ под высоким давлением [2].

Расчет узла крепления выбранных пластин для титана и сталей с учетом действующих сил

К проблемам использования твердосплавных режущих пластин можно отнести следующее: коэффициент трения между твердым сплавом и стальным корпусом значительно меньше, чем между быстрорежущей и конструкционной сталью. Поэтому следует стремиться к такой форме крепления режущих элементов, при которой обеспечивается надежность закрепления.

Для проведения экспериментальных исследований жесткости различных схем крепления пластин использовался вертикально-фрезерный станок HECKERT FSS 315 V/2.

Рассматривались схемы крепления винтом сверху, методом косой тяги, клиновое крепление, напайное крепление, крепление силами упругой деформации и др.

Давление измерялось при помощи тарированной динамометрической скобы с индикаторной головкой. Прогиб вершины резца измерялся при помощи индикаторной головки. В испытаниях наилучшие результаты показали образцы, методом крепления пластин которых были напайная конструкция и винт.

Окончательно выбранная схема крепления пластин к корпусу протяжки изображена на рис. 6.

На рис. 7 представлен узел крепления твердосплавных многогранных пластин, оптимальный для действующих нагрузок на режущие кромки в процессе протягивания. В данном примере нагрузки компенсируются жесткими поверхностями корпуса протяжки, нагрузки на регулируемые или подвижные опоры отсутствуют. Крепление производится винтом сверху с утопающей головкой, что не препятствует движению протяжки, сходу стружки.

Данный способ крепления пластины широко используется в режущих инструментах при сверлильных и фрезерных работах.

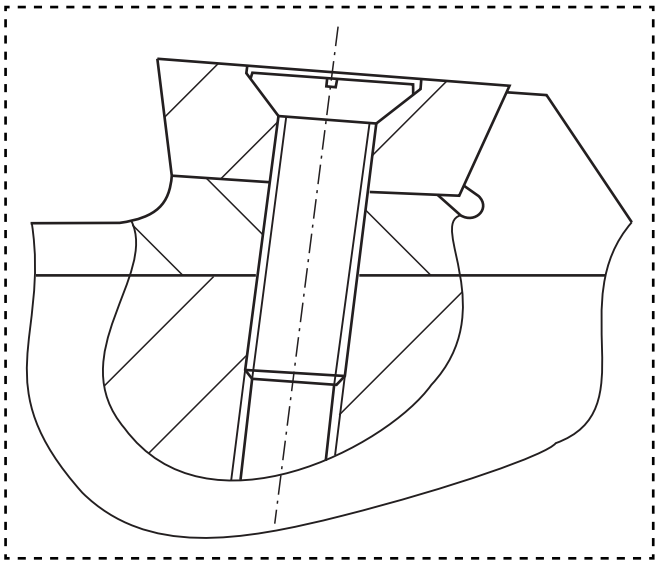


Рис. 6. Оптимальная схема крепления пластин из титановых сплавов и сталей с учетом действующих сил

Расчет протяжки предусматривает выбор оптимального угла наклона зубьев, переднего и заднего углов резания, размеров зуба и впадины, расчет P_z, $M_{изг}$, прочности резьбы на срез $T_{ср}$, прочности резьбы на смятие $\sigma_{см}$.

Выбор оптимального наклона зубьев

На плоских протяжках часто делают зубья под углом наклона ω. Однако это усложняет изготовление протяжек и увеличивает их длину. Угол наклона зубьев ω может быть равен 0; 10; 15 и 20° [3].

Проектируемая протяжка имеет угол наклона зубьев ω = 0.

Передний угол выбираем по нормативам [3] в пределах γ = 4...20° в зависимости от обрабатываемого материала разной твердости. Чем тверже материал, тем меньше угол. *Задний угол* α = 1...4° в зависимости от класса точности обработки.

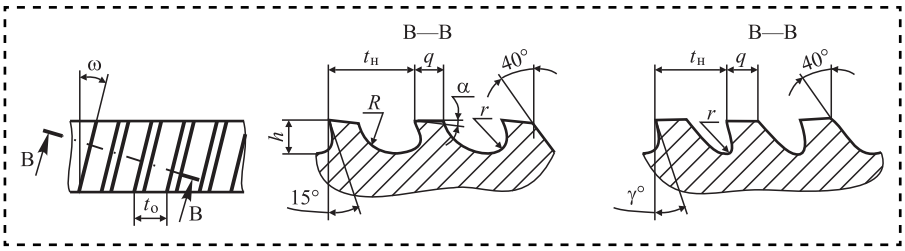


Рис. 7. Протяжки с наклоном зубьев под углом ω

В связи с твердостью и сложностью обработки титановых и жаропрочных сплавов, а также высоким классом точности принимаем передний угол $\gamma = 4°$, задний угол $\alpha = 3°$.

В протяжке предлагается использовать пластины фирмы Sandvik. Принятые углы резания будут достигаться путем наклонного расположения режущей пластины, у которой задний угол $\alpha = 7°$. При наклоне опорной поверхности под углом 4° образуется передний угол $\gamma = 4°$, задний угол $\alpha = 3°$.

Размеры зуба и впадины между зубьями выбираем по таблице в зависимости от площади сечения металла, снимаемого одним режущим зубом протяжки. Площадь сечения впадины между зубьями должна отвечать условию

$$k = F_в/F_с = 2...5, \quad (3)$$

где $k = 5$ — объемный коэффициент заполнения впадины;

$F_в$ — площадь сечения впадины, мм;

$F_с$ — площадь сечения металла, снимаемого одним зубом, мм;

$$F_с = LS_z = 100 \cdot 0{,}08 = 8 \text{ мм}^2. \quad (4)$$

Находим

$$F_в = kF_с = 5 \cdot 8 = 40 \text{ мм}^2. \quad (5)$$

Пользуясь таблицей по назначению параметров режущих зубьев протяжки [3], для ближайшего значения $F_в = 38{,}0$ мм^2 при прямолинейной форме впадины зуба принимаем:

шаг протяжки $t = 16$ мм;

глубина впадины $h = 7$ мм;

длина задней поверхности $b = 4{,}0$ мм;

радиус закругления впадины $R = 3{,}5$ мм и $r = 3$ мм.

Учитывая, что ширина b пластины равна 16 мм, принимаем шаг протяжки $t = 16 + 16 = 32$ мм. Соответственно, глубина впадины $h = 10{,}0$ мм; радиус закругления впадины оставляем $R = 3{,}5$ мм и $r = 3$ мм.

Увеличение шага протяжки и глубины впадины приведет к увеличению площади сечения впадины $F_в$, что не сказывается на работоспособности протяжки.

Расчет необходимого усилия для закрепления сменных твердосплавных пластин на протяжке

Для расчета необходимого усилия сначала определяем усилие, которое воздействует на пластину (силу резания P_z):

$$P_z = PB, \quad (6)$$

где P — удельная сила резания, приходящая на 1 мм^2 лезвия зуба протяжки, Н/мм^2;

B — площадь поперечного сечения слоя, снимаемого одним зубом в мм^2;

$P = 335$ Н/мм^2 согласно таблице из [4] при подаче на зуб $S = 0{,}08$ мм/зуб;

$B = bz$, где $b = 16$ мм (ширина режущей пластины), $z = 0{,}08$ мм (подъем зуба);

$$B = bz = 16 \cdot 0{,}08 = 1{,}28 \text{ мм}^2;$$

$$P_z = PB = 335 \cdot 1{,}28 = 428{,}8 \text{ Н}.$$

Изгибающий момент, действующий на режущую пластину, имеет вид

$$M_{изг} = P_z h \operatorname{tg}\alpha, \quad (7)$$

где h — плечо действия силы P_z относительно оси прижима (винта), равное $b/2 = 16/2 = 8$ мм;

$\operatorname{tg}\alpha$ — угол наклона пластины ($\operatorname{tg} 3° = 0{,}0524$);

$$M_{изг} = P_z h \operatorname{tg}\alpha = 428{,}8 \cdot 8 \cdot 0{,}0524 = \\ = 179{,}78 \text{ Н}\cdot\text{мм} = 0{,}179 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Расчет прочности резьбы на срез *осуществляется по формулам*

$$T_{ср} = Q/A_{ср} <= [T_{ср}], \quad (8)$$

где Q — осевая сила;

$A_{ср}$ — площадь среза витков нарезки. Для винта $A_{ср} = \pi d_1 k H_r$. Здесь H_r — высота резьбы, k — коэффициент, учитывающий ширину основания витков резьбы: для метрической резьбы для винта $k \approx 0{,}75$.

$$A_{ср} = \pi d_1 k H_r = \\ = 3{,}14 \cdot 3{,}5 \cdot 0{,}75 \cdot 8 = 65{,}94 \text{ мм}^2; \quad (9)$$

$$T_{ср} = Q/A_{ср} = 179{,}78/65{,}94 = 2{,}73 \text{ Н/мм} < [T_{ср}].$$

Условие прочности резьбы на смятие *имеет вид*

$$\sigma_{см} = Q/A_{см} <= [\sigma_{см}], \qquad (10)$$

где $A_{см}$ — условная площадь смятия. Для винта $A_{см} = \pi d_2 hz$. Здесь πd_2 — длина одного витка по среднему диаметру; h — рабочая высота профиля резьбы; $z = H_r/p$ — число витков резьбы; p — шаг резьбы;

$$Z = H_r/p = 8/0{,}6 = 13 \text{ витков}; \qquad (11)$$

$$A_{см} = \pi d_2 hz = 3{,}14 \cdot 3{,}11 \cdot 8 \cdot 13 = 1015{,}6 \text{ мм}^2; \qquad (12)$$

$$\sigma_{см} = Q/A_{см} = 179{,}78/1015{,}6 = 0{,}18 \text{ Н/мм} < [\sigma_{см}].$$

Применяемый винт М3,5×8 выдерживает нагрузку, действующую на пластину ($M_{изг}$ = = 0,179 Н·м; P_z = 428,8 Н).

Выводы

1. Применение протяжек из быстрорежущей стали ограничивает процесс протягивания максимальной скоростью резания v = 1,5...2 м/мин.

2. Протяжки с напайными твердосплавными пластинами имеют следующие недостатки: износ одного зуба приводит к переточке всех зубьев или забраковке всей протяжки, наличию остаточных напряжений в пластинах после пайки и переточки зубьев.

3. Решением проблем современного протягивания является применение сборных протяжек со сменными твердосплавными пластинами.

4. В результате эксперимента найден оптимальный метод крепления твердосплавных пластин на протяжке.

5. Данное решение позволяет спроектировать и изготовить протяжки с обработкой замка одновременно с пяти сторон, что обеспечит экономию 2 млн руб. в год.

Библиографический список

1. **Макаров В.Ф.** Выбор и назначение оптимальных условий протягивания заготовок из труднообрабатываемых материалов: учеб.-метод. пособие. "Технология механообработки". Пермь: Изд-во Перм. гос. ун-та, 2008. 395 с.

2. **Дополнение** к каталогам — "Токарные инструменты" и "Вращающиеся инструменты" — CoroPak 13.2, 2013.

3. **Справочник** технолога машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова. М.: Машиностроение, 1986. 496 с.

4. **Макаров В.Ф.** Оптимизация протягивания труднообрабатываемых материалов. Старый Оскол: Изд-во ТНТ, 2014. 440 с.

УДК 621.28.9

С.А. Микаева, *д-р техн. наук,* **А.С. Микаева,** *канд. экон. наук*
(Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники)
E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

Сборка амальгамных бактерицидных ламп низкого давления типа ДБ

Рассмотрена сборка амальгамной бактерицидной лампы низкого давления с электронным пускорегулирующим аппаратом. Лампа предназначена для работы в качестве источника ультрафиолетового излучения и применяется в установках по обеззараживанию воды. Представлены значения параметров для ламп типа ДБ, габаритные и присоединительные размеры. Описана схема системы измерения электрических параметров и излучения, а также характеристическая кривая выхода ламп из строя в процессе испытаний.

Considered the assembly of amalgam germicidal lamps low pressure with an electronic starter device. The lamp is designed for operation as a source of ultraviolet radiation and is used in water disinfection installations. The parameter values for lamps type DB, overall and mounting dimensions are presented. Describes the system of measurement of electrical parameters and radiation, and the characteristic curve of the output of the lamps failed during the test.

Ключевые слова: амальгамная бактерицидная лампа, низкое давление, пускорегулирующий аппарат, электрические параметры.

Keywords: amalgam germicidal lamp, low pressure, ballast of the device, electrical parameters.

Основой любой ультрафиолетовой (УФ) системы обеззараживания воды, воздуха и поверхности является УФ-источник (лампа) [1—3]. Характеристики УФ-ламп — мощность, КПД, габаритные размеры, ресурс, цена и т.д. — определяют свойства и возможности УФ-установки. Тип и количество используемых УФ-ламп зависят не только от требуемой дозы УФ-облучения, расхода, физико-химических показателей качества обрабатываемой среды, но и от условий размещения и эксплуатации.

УФ-излучение — это физический метод обеззараживания, основанный на фотохимических реакциях, которые приводят к необратимым повреждениям ДНК и РНК микроорганизмов. В результате микроорганизм теряет способность к размножению (инактивируется). Технология ультрафиолетового обеззараживания может применяться как в системах водоподготовки и водоотведения, так и при обеззараживании воздуха и поверхностей [4—6].

В УФ-системах делается ставка прежде всего на лампы низкого давления и их новое поколение — амальгамные лампы, являющиеся самыми энергоэффективными источниками УФ-излучения в настоящее время (в специальных задачах также применяются и другие типы УФ-ламп).

Лампы типа ДБ (дуговая бактерицидная) рассчитаны для работы с электронными пускорегулирующими аппаратами (ЭПРА) соответствующей мощности при питании от сети переменного тока частоты 50/60 Гц с номинальным напряжением 220/230 В ± 10 % или в трехфазных сетях переменного тока частоты 50/60 Гц с номинальным напряжением 3×380/400 В в зависимости от типа ЭПРА.

Лампа предназначена для использования в качестве источника монохромного ультрафиолетового излучения длиной волны 253,7 нм в установках обеззараживания воды. Климатическое исполнение лампы — УХЛ, категория размещения 4.2 по ГОСТ 15150—69. Основные параметры ламп должны соответствовать значениям, приведенным в табл. 1.

Общий вид, габаритные, установочные и присоединительные размеры собранных ламп,

Таблица 1

Основные параметры ламп типа ДБ

Наименование параметра	Тип лампы									
	ДБ95	ДБ145	ДБ200	ДБ240	ДБ 300, ДБ300В	ДБ300Н, ДБ300Н-2	ДБ 350, ДБ 350В, ДБ 50ВЛ	ДБ500, ДБ500В, ДБ500ВЛ, ДБ500-2	ДБ600, ДБ600В, ДБ600ВЛ	ДБ 800, ДБ 800В, ДБ 800ВЛ, ДБ 800-2
Мощность лампы[1], номинальная, Вт	95 ± 5	145 ± 5	170 ± 7	200 ± 10	235 ± 10	240 ± 10	325 ± 10	440±12	510 ± 15	710 ± 15
Напряжение на лампе[2], номинальное, В	48 ± 10	73 ± 10	90 ± 10	105 ± 10	127 ± 5	78 ± 10	100 ± 10	90 ± 10	160 ± 10	140 ± 10
Ток через лампу[2], А	2,0 ± 0,1		1,85 ± 0,1			3,2 ± 0,1		5,0 ± 0,1	3,0 ± 0,1	5,0 ± 0,1
Время зажигания лампы, с	Не более 60									
Мощность потока излучения[3] на длине волны λ = 253,7 нм в телесном угле 4π стерадиан, Вт	30 ± 3	50 ± 3	58 ± 3	65 ± 3	87 ± 3	90 ± 5	125 ± 5	150 ± 5	210 ± 10	240 ± 10
Мощность потока излучения[4] на длине волны λ = 253,7 нм в телесном угле 4π стерадиан после 12 000 ч работы, Вт, не менее	24	40	48	55	74	77	100	125	165	190
Масса ламп, г	130	150	195	245	290	380	480	480	700	700

[1] Мощность, потребляемая лампой без учета потерь в ЭПРА.
[2] После 8 ч непрерывной работы лампы.
[3] Справочная величина. Погрешность измерения мощности потока излучения ±11 %. Значения мощности лампы ниже номинальной и мощности потока излучения на длине волны λ = 253,7 нм выше номинальной не ограничиваются.
[4] В рабочих условиях при непрерывной работе.

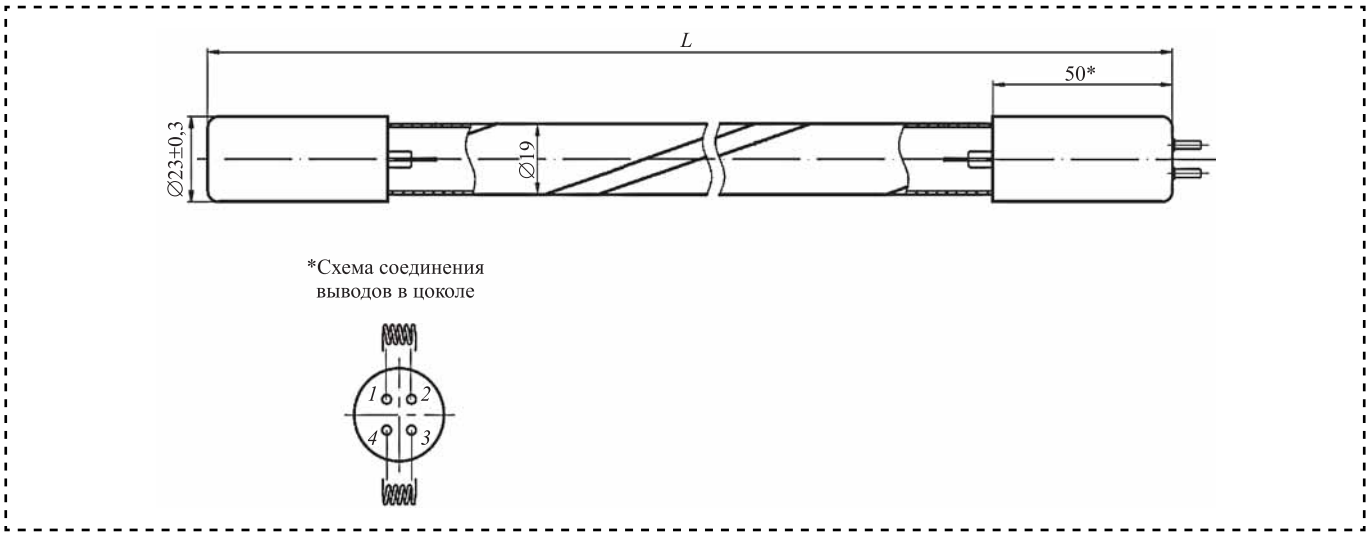


Рис. 1. Габаритные и присоединительные размеры лампы типа ДБ

тип цоколя должны соответствовать значениям, указанным на рис. 1 и в табл. 2. Максимальное число циклов включения-выключения собранных ламп должно соответствовать значениям, указанным в табл. 3. Климатическое исполнение собранных ламп — по ГОСТ 15150—69 со следующими уточнениями: нижнее значение рабочей температуры 0 °С; верхнее 40 °С.

Таблица 2

Габаритные и присоединительные размеры лампы типа ДБ

Тип лампы	Длина *L* лампы, мм
ДБ 95	594_{-4}
ДБ 145	845_{-4}
ДБ 200	1095_{-4}
ДБ 240	1220_{-4}
ДБ 300	1600_{-4}
ДБ 300Н	1220_{-4}
ДБ 350	1600_{-4}
ДБ 350В	1600_{-4}
ДБ 350ВЛ	1600_{-4}
ДБ 500В	1600_{-4}
ДБ 500ВЛ	1600_{-4}
ДБ 600	2460_{-4}
ДБ 600В	2460_{-4}
ДБ 600ВЛ	2460_{-4}
ДБ 800В	2460_{-4}
ДБ 800ВЛ	2460_{-4}

В собранных лампах должны отсутствовать обрывы в токоведущих частях, а также замыкания токовых вводов между собой. Внутри ламп не должно быть посторонних частиц, способных вызвать нарушение работоспособности ламп. Крепление цоколя к колбе лампы должно быть прочным, не допускающим отделения цоколя от колбы при приложении к нему крутящего момента, постепенно возрастающего до 4,0 Н·м. Цоколи и колба лампы должны находиться на одной оси. Угол между осями цоколей и колбы лампы не должен превышать 6°. Токовые выводы лампы должны быть прочно припаяны или приварены к цоколям.

Изоляция цоколей должна выдерживать испытательное напряжение, равное 1500 В, без пробоя и перекрытия в течение одной минуты; сопротивление изоляции цоколей — не менее 2 МОм во всем диапазоне климатических условий. Лампа должна быть работоспособна при следующих условиях: рабочая температура окружающей среды 0...40 °С; относительная влажность воздуха (95 ± 3) % при температуре (40 ± 3) °С. Ресурс работы лампы составляет 12 000 ч. Материал оболочки ламп — безозоновое кварцевое стекло.

Требования безопасности должны соответствовать ГОСТ 12.2.007.13—2000 и СН № 4557—88 "Санитарные нормы ультрафиолетового излучения в производственных помещениях". Облучение открытой лампой может вызвать ожо-

Таблица 3

Число циклов включения-выключения ламп

Тип ЭПРА	Тип лампы							
	ДБ 95	ДБ 145	ДБ 200, ДБ 240, ДБ 300, ДБ 300В	ДБ300Н, ДБ300Н-2	ДБ350, ДБ350В, ДБ350ВЛ	ДБ500, ДБ500В, ДБ500ВЛ, ДБ500-2	ДБ600, ДБ600В, ДБ600ВЛ	ДБ800, ДБ800В, ДБ800ВЛ, ДБ 800-2
ЭПРА Л~220-1х120-2202-181	5000	—	—					
ЭПРА Л~220-1х(95-145)-2202-184, ЭПРА Л~220-1х170-2202-181, ЭПРА Л~220-2х(100-170)-2202-183, ЭПРА Л~220-1х215-3302-185	5000	5000	—	—				
ЭПРА Л~220-1х300-2202-16, ЭПРА Л~220-1х300-2222-16	—	—	5000	—				
ЭПРА Л~220-1х350-2222-18, ЭПРА Л~220-1х350-2222-18 (М)	—	—	—	5000				
ЭПРА Л~220-1х500-2222-161						5000		
ЭПРА Л~220-1х600-2222-161					5000		5000	
ЭПРА Л~220-1х800-2222-161						5000		5000
ЭПРА Л~3х380-6х350/600-3322-50, ЭПРА Л~3х380-6х350/600-2222-51, ЭПРА Л~3х380-6х350/600-2222-52					5000		5000	
ЭПРА Л~3х380-6х800-2222-52						5000		5000

ги глаз, кожи лица, рук и других открытых частей тела. Лицо и глаза защищают от ультрафиолетового излучения маской, щитком или шлемом со специальными стеклами.

В случае механического повреждения лампы ее осколки необходимо вынести за пределы помещения или поместить в закрытый объем для последующего уничтожения. Место, где разбилась лампа, нужно промыть 1,0%-ным раствором марганцовокислого калия.

Контроль на соответствие требованиям к электрическим параметрам и параметрам излучения должен осуществляться по схеме, представленной на рис. 2.

Измерения напряжения на лампе, тока через лампу и потребляемой лампой электрической мощности проводятся прибором PZ4000 (Yokogawa) или аналогичным, обеспечивающим не меньшую точность. Ток через лампу измеряется при помощи предварительно откалиброванного токового шунта (погрешность измерения составляет не более ± 5 %). Проверка производится с соответствующим ЭПРА. Мощность потока излучения на длине волны $\lambda = 253{,}7$ нм в телесном угле 4π стерадиан контролируют по специальной методике ЛИТ-ОИС-03.

Контроль на соответствие требованиям по стойкости к внешним воздействующим факторам и испытание ламп на воздействие нижнего значения температуры среды при хранении должно проводиться по ГОСТ 20.57.406—81. При этом температура в камере устанавливается равной (−50 ± 3) °С. Время выдержки 1 ч.

Лампы считаются выдержавшими испытания на климатические воздействия, если при включении по схеме, представленной на рис. 2, они горят, а параметры соответствуют значениям, приведенным в табл. 1.

Испытание ламп на виброустойчивость проводится в диапазоне частот и ускорений, указанных в табл. 4. Время воздействия в каждом положении составляет 1 мин. Измерение проводится путем плавного изменения частоты в заданном диапазоне от низшей частоты к высшей частоте и обратно. Испытания проводят в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Лампы считаются выдержавшими испытания, если при включении по схеме, представленной на рис. 2, они горят в течение 1 мин. Контроль на соответствие требованиям

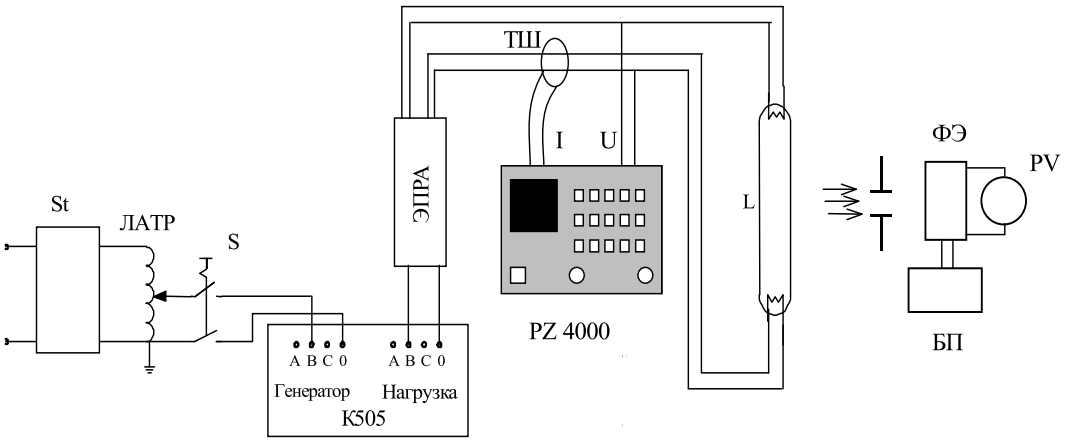


Рис. 2. Схема системы измерения электрических параметров и излучения:
St — стабилизатор напряжения; ЛАТР — автотрансформатор АОСН-4-220-82 УХЛ4; S — ключ; К505 — комплекс измерительный; *L* — испытуемая лампа; PZ 4000 — измеритель напряжения, тока и потребляемой мощности лампой PZ 4000 (Yokogawa); ФЭ — УФ-радиометр ТКА-ПКМ (12); PV — вольтметр Щ31; БП — блок питания фотоэлемента БП3-47; ТШ — токовый шунт

Таблица 4

Диапазон частот и ускорений ламп на виброустойчивость

Поддиапазон частот, Гц	Амплитуда перемещения, мм	Амплитуда ускорения, м/с^2 (g)
10	1,0	—
10...20	1,0	—
20...30	—	5 (0,5)
30...40	—	5 (0,5)
40...50	—	5 (0,5)

надежности проводится по ГОСТ 6825—91. Параметры-критерии годности (см. табл. 1) контролируют до и после испытаний ламп. Периодичность контроля этих параметров при испытаниях на продолжительность горения составляет 0,8, 100, 200, 500 и далее 1000 ч.

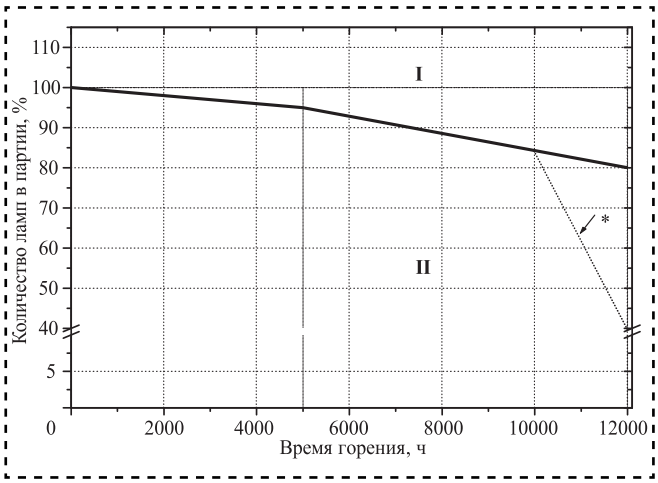


Рис. 3. Характеристическая кривая выхода из строя ламп в процессе испытаний

Число ламп, подлежащих испытаниям на долговечность, должно быть не менее 8, продолжительность горения определяется по рис. 3.

Лампы, попавшие в область **I**, считаются выдержавшими испытание, если их выход из строя определяется точками, лежащими над характеристической линией.

Широкая гамма этих ламп мощностью от 15 Вт до 1 кВт, с КПД ~ 40 % и ресурсом 16 000 ч как собственного производства, так и ведущих мировых производителей (Philips lighting, LSI/Lighttech) позволяет создать энергоэффективные УФ-системы любой производительности и надежно обеспечивать заказчика качественным УФ-источником в любое время в любой точке мира.

Библиографический список

1. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Автоматизированная сборка компактных люминесцентных ламп // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 36—38.

2. **Ашрятов А.А., Микаева С.А., Микаева А.С.** Приборы для контроля сборки компактных люминесцентных ламп // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 23—26.

3. **Ашрятов А.А., Микаева С.А.** Исследование линейных светодиодных ламп для прямой замены люминесцентных ламп // Справочник. Инженерный журнал. 2013. № 9. С. 55—60.

4. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е.** Системы обеззараживания ультрафиолетом // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 2. С. 44—48.

5. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е., Амелькина С.А.** Облучатели бактерицидные // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 11. С. 3—6.

6. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Обеззараживание воды ультрафиолетовым излучением // Автоматизация и современные технологии. 2014. № 11. С. 8—11.

УДК 621.981.12

В.К. Моисеев, *д-р техн. наук,* **В.Г. Кулаков, А.А. Шаров**, *канд. техн. наук,*
Е.Г. Громова, *канд. техн. наук (Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева)*
E-mail: moiseevvk@mail.ru

Обеспечение взаимозаменяемости при сборке изделий из маложестких деталей за счет стесненного изгиба эластомером

Изложены результаты исследований, посвященных обеспечению взаимозаменяемости маложестких деталей, изготавливаемых из листовых полуфабрикатов изгибом с наложением всестороннего сжатия, разработана методика проектирования техпроцесса и технологического оснащения.

Results of the researches devoted to ensuring interchangeability of the details made of a leaf a bend with imposing of comprehensive compression are developed the technique of development of technical process and processing equipment and process is offered.

Ключевые слова: взаимозаменяемость, технология, детали небольшой жесткости, гибка, всестороннее сжатие.

Keywords: interchangeability, technology, details of small rigidity, bend, comprehensive compression.

При сборке конструкций, содержащих маложесткие детали, обеспечение взаимозаменяемости усложняется в связи с неприменимостью системы допусков и посадок. Так, в сборочных единицах самолетов, ракет и других летательных аппаратов в большом количестве присутствуют детали, получаемые гибкой из тонколистовых заготовок эластомером (рис. 1, 2 на стр. 2 обложки). Такие детали имеют следующие конструктивные размеры:

высота борта 15...30 мм;
радиус гиба 1,5...4 мм;
угол гиба 90°;
длина 140...2000 мм;
ширина 80...270 мм.

Борта могут быть в плане прямолинейными и криволинейными, а также отогнутыми как в одну, так и в разные стороны.

Технические требования к конструкции таких деталей предусматривают ограничение радиусов гиба, которое, как правило, составляет не менее трех толщин стенки. Это вызвано технологическими соображениями, так как гибка на меньший радиус традиционными способами выходит за пределы пластических возможностей материала детали, а также вызывает чрезмерное, а зачастую, недопустимое утонение стенки в радиусной зоне.

Вместе с тем детали с большим радиусом гиба имеют пониженную жесткость и значительный разброс отклонений от номинала получаемых углов, вызываемый эффектом пружинения борта при традиционных заготовительно-штамповочных технологиях. Этот эффект учитывают при изготовлении технологического оснащения, однако разброс отклонений тем не менее требует ручных доводочных работ в целях корректировки угла гиба до величин, приемлемых для постановки детали в сборочную единицу.

Проведенные исследования показали, что стабилизировать получаемый угол гиба можно путем наложения в завершающей стадии процесса формообразования эластомером так называемого стесненного изгиба, применяемого в настоящее время преимущественно только в прокатке и волочении прямолинейных профилей [1—3].

В отличие от прокатки и волочения, применяемых для изготовления длинномерных прямолинейных профилей, стесненный изгиб эластомером целесообразно использовать при штамповке деталей более сложных форм и относительно небольших габаритных размеров.

На рис. 3 показана одна из схем стесненного изгиба бортов инструментом из эластичного материала. Разработано несколько подобных схем, защищенных охранными документами.

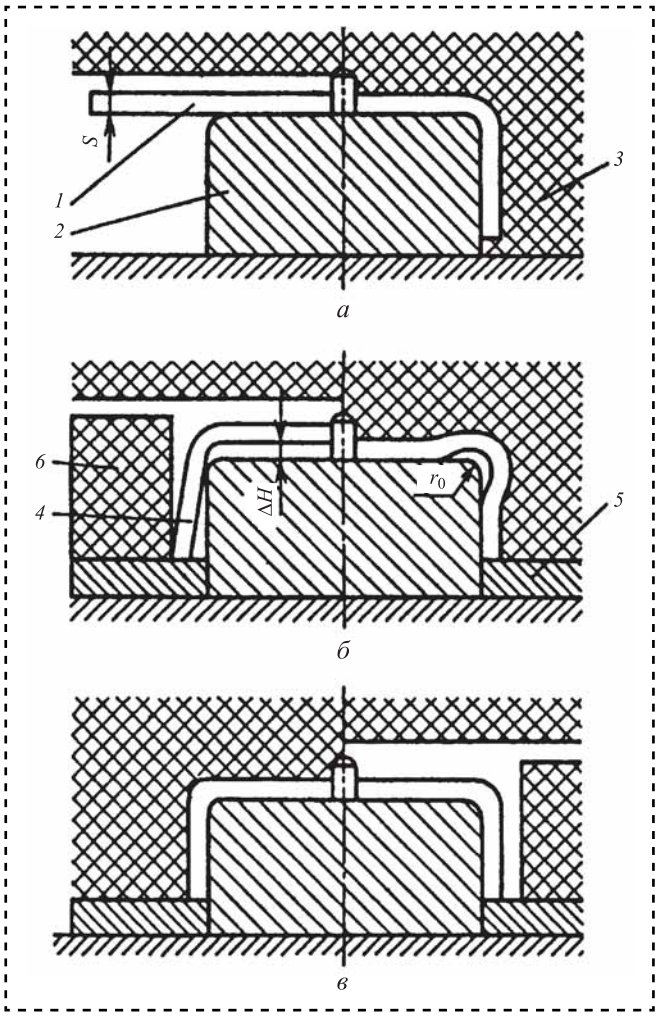


Рис. 3. Схема стесненного изгиба с подкладной пластиной

Согласно представленной схеме стесненный изгиб осуществляется за два перехода. Вначале заготовка *1* изгибается по гибочной оправке *2* под действием давления эластичного инструмента *3*, заключенного в контейнер, который условно не показан (рис. 3, *а*). Затем под торец изогнутого борта заготовки *4* устанавливается пластина *5* для создания определенного зазора ΔH между верхней плоскостью гибочной оправки и стенкой заготовки (рис. 3, *б*, слева). Для предотвращения потери устойчивости изогнутого борта заготовки *4* на опорную пластину *5* ставятся эластичные подпоры *6*. Под действием давления эластомера стенка заготовки вначале прогибается в центральной части, а затем образуется волна избыточного материала в зоне скругления гибочной оправки с радиусом r_0 (рис. 3, *б*, справа). При дальнейшем увеличении давления эластичного инструмента волна избыточного материала деформируется по радиусу гибочной оправки (рис. 3, *в*). В результате толщина заготовки в зоне радиуса гиба увеличивается, а пружинение борта уменьшается за счет изменения схемы напряженно-деформированного состояния материала.

По схеме, представленной на рис. 3, были проведены эксперименты по стесненному изгибу выпуклых криволинейных бортов полиуретаном.

На рис. 4 на стр. 3 обложки представлено поэтапное формоизменение заготовки при нарастании усилия пресса. Эта схема была выбрана для экспериментальных исследований в силу того, что в результате первого перехода получается образец, изогнутый по традиционной технологии без стесненного изгиба. Этот промежуточный образец удобно использовать для сравнительного анализа обычного изгиба и стесненного изгиба как по распределению толщин стенки по сечениям, так и по углу пружинения борта.

Штамповались детали из алюминиевого сплава Д16АМ толщиной 1,5 и 1,8 мм. Радиус гиба борта составлял 4 мм, радиус *R* борта в плане — 120 и 150 мм.

Экспериментальная проверка кинематики процесса изготовления деталей летательных аппаратов методом стесненного изгиба при штамповке эластомером проведена с целью подтверждения соответствия физических процессов пластического деформирования и выбранных исходных уравнений и граничных условий при решении краевой задачи пластического деформирования заготовки. Данные экспериментальные исследования проведены для выбора наиболее адекватного теоретического решения краевой задачи пластического деформирования и для оценки погрешности используемых в разработанной методике проектирования теоретических методов расчета входных и выходных параметров процесса стесненного изгиба при штамповке деталей летательных аппаратов эластомером. Результаты исследования показали, что для формообразования в условиях стесненного изгиба образцов из материала Д16АМ толщиной $S = 1{,}5$ мм требуется давление около 180 МПа, а для образцов толщиной $S = 1{,}8$ мм требуется давление около 240 МПа.

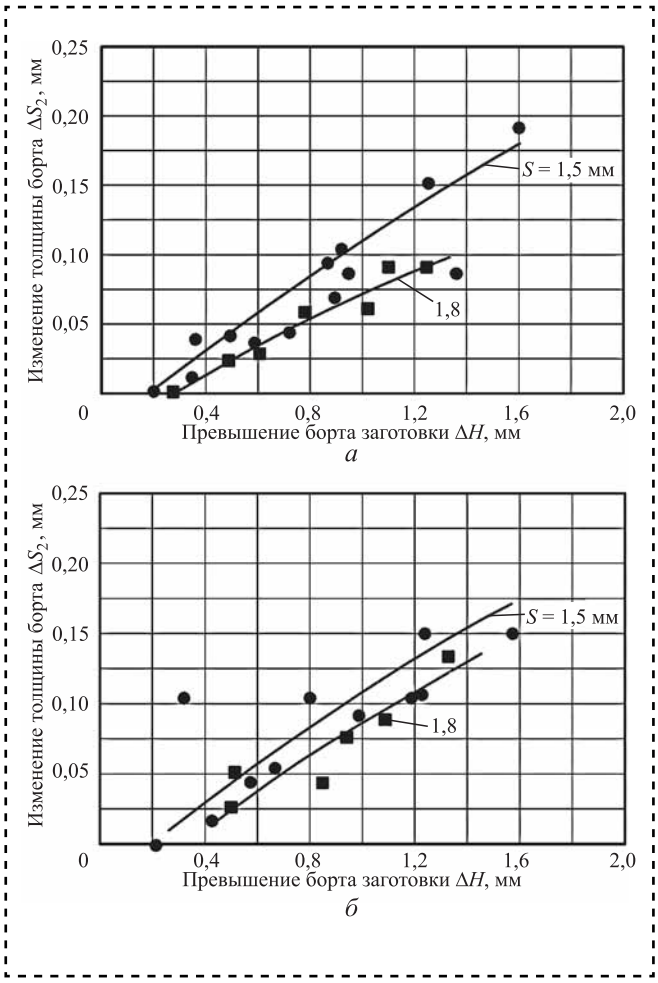


Рис. 5. Изменение толщины материала детали в радиусной зоне для следующих радиусов борта в плане:
а — R = 120 мм; *б* — R = 150 мм

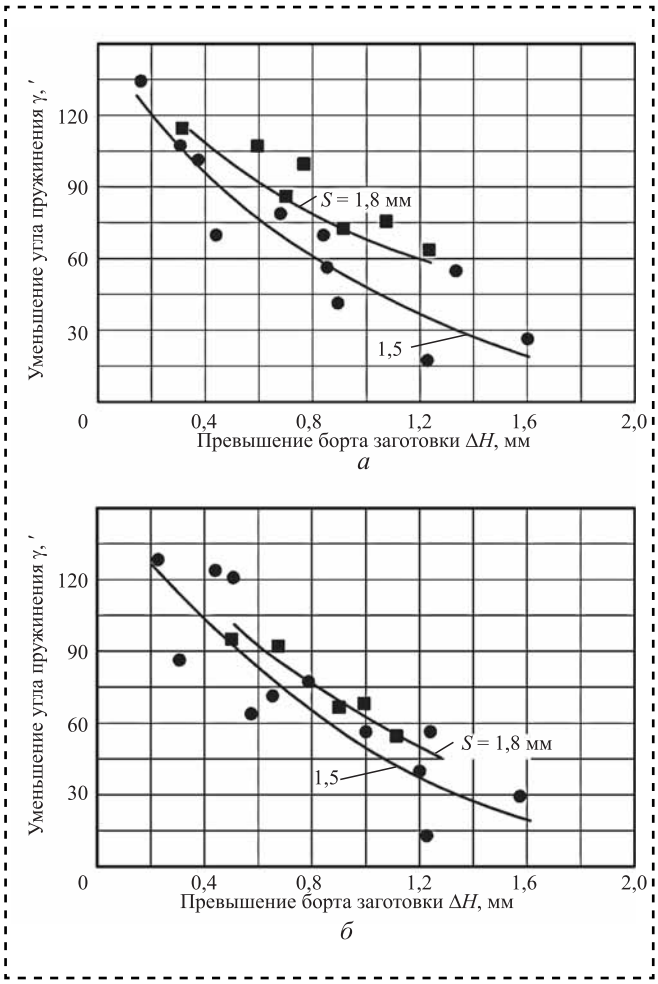


Рис. 6. Уменьшение угла пружинения борта детали для следующих радиусов борта в плане:
а — R = 120 мм; *б* — R = 150 мм

По результатам экспериментальных исследований построены графики изменения толщины материала детали в радиусной зоне для радиусов борта в плане R = 120 мм (рис. 5, *а*) и R = 150 мм (рис. 5, *б*). Кроме того, построены экспериментальные графики, показывающие уменьшение угла гиба борта детали для радиусов борта в плане R = 120 мм (рис. 6, *а*) и R = 150 мм (рис. 6, *б*). Из графиков следует, что вместо утонения в критической зоне радиуса гиба создается утолщение стенки, а отклонение угла гиба борта от номинала заметно уменьшается.

Проводилось конечно-элементное моделирование стесненного изгиба, некоторые результаты которого представлены на рис. 7, 8 на стр. 3 обложки.

Сравнение результатов конечно-элементного моделирования и экспериментальных данных показывает их приемлемую корреляцию.

Полученные данные наряду с ранее опубликованными результатами теоретических исследований [4—6] позволили разработать методику проектирования технологического процесса, обеспечивающего задаваемую точность угла гиба без ручных доводочных работ для обеспечения взаимозаменяемости при сборке узлов, содержащих маложесткие детали данного типа. Алгоритм методики приведен на рис. 9.

Разработанный алгоритм позволяет рассчитать параметры технологического процесса, определить размеры заготовки-полуфабриката, спроектировать технологическую оснастку.

Итак, проведены многосторонние исследования стесненного изгиба деталей эластомером, обеспечивающего улучшение качества

Рис. 9. Алгоритм разработки технологического процесса штамповки детали методом стесненного изгиба эластомером

деталей, поставляемых на сборку, а именно увеличение толщины стенки вместо традиционного утонения и уменьшение и стабилизацию углов пружинения. Результаты теоретических исследований, экспериментов и конечно-элементного моделирования коррелируют друг с другом и подтверждают адекватность моделей и приемлемость принятых допущений и граничных условий. Приведенные результаты исследований и разработок позволяют успешно применить технологию стесненного изгиба для обеспечения взаимозаменяемости при сборке узлов, содержащих маложесткие детали, получаемые штамповкой из листовых заготовок.

Библиографический список

1. **Колганов И.М., Проскуряков Г.В.** Формообразование профилей стесненным изгибом при сочетании процессов волочения и прокатки // Авиационная промышленность. 1983. № 1. С. 40—42.

2. **Проскуряков Г.В.** Стесненный изгиб // Авиационная промышленность. 1966. № 2. С. 9—13.

3. **Перфильев О.В.** Совершенствование технологии изготовления гнутолистовых профилей авиационных конструкций стесненным изгибом: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Ульяновск, 2011. 149 с.

4. **Комаров А.Д.** и др. Исследование пружинения прямолинейных бортов при стесненном изгибе листовых заготовок эластичной средой // Кузнечно-штамповочное производство. 1998. № 12. С. 8—11.

5. **Комаров А.Д.** и др. Исследование пружинения криволинейных бортов при стесненном изгибе листовых заготовок эластичной средой // Кузнечно-штамповочное производство. 2000. № 4. С. 3—9.

6. **Комаров А.Д., Шаров А.А., Моисеев В.К.** Способы уменьшения и стабилизации пружинения деталей при гибке эластичной средой // Кузнечно-штамповочное производство. 1993. № 7. С. 13—16.

УДК 621.88 (045)

И.В. Батинов, *канд. техн. наук (Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова),*
Е.С. Петрова *(Ижевский электромеханический завод "Купол")*
E-mail: mit_vladi@mail.ru

Влияние технологии изготовления штифтовых прессовых соединений на эксплуатационные свойства изделий

Одним из направлений повышения эксплуатационных свойств сборочных штифтовых соединений является достижение их качества технологическими методами обработки сопрягаемых поверхностей изделий. В связи с этим изучается влияние отделочной обработки мелкоразмерных отверстий путем дорнования и развертывания на эксплуатационные свойства сборочного узла. Рассматривается напряженно-деформированное состояние соединения, а также результаты экспериментальных исследований параметров качества обработки и эксплуатационных свойств изделия.

One of the ways of increasing the performance of pin connection assembly is to achieve a quality of technological methods of processing interfaced surfaces of assembly. In this paper examines the effect finishing machining of holes small diameter, in particular burnishing and the reaming, at the performance of the assembly. We consider the stress-strain connection state, and the results of experimental studies quality parameters of machining and performance of the assembly.

Ключевые слова: дорнование, обработка отверстий.

Keywords: burnishing, machining holes.

Введение

Штифтовые соединения, изготавливаемые запрессовкой, нашли широкое применение в конструкциях механизмов машиностроения и приборостроения [1]. Повышение требований конструкции к точности таких механизмов во многом обеспечивается технологией изготовления сопрягаемых деталей и сборкой соединений. В данной статье рассматриваются мелкоразмерные штифтовые соединения.

Известно, что изготовление мелкоразмерных (диаметром 3...10 мм) отверстий с высокими требованиями точности является технологически сложной задачей [2]. Особым видом штифтовых соединений являются такие соединения, в которых запрессовка штифта производится в поперечном сечении (рис. 1).

Другим аспектом изучения штифтовых соединений является анализ влияния технологии изготовления сопрягаемых поверхностей на повышение несущей способности соединения. Исследуем влияние механической обработки сопрягаемых поверхностей на эксплуатационные характеристики узла.

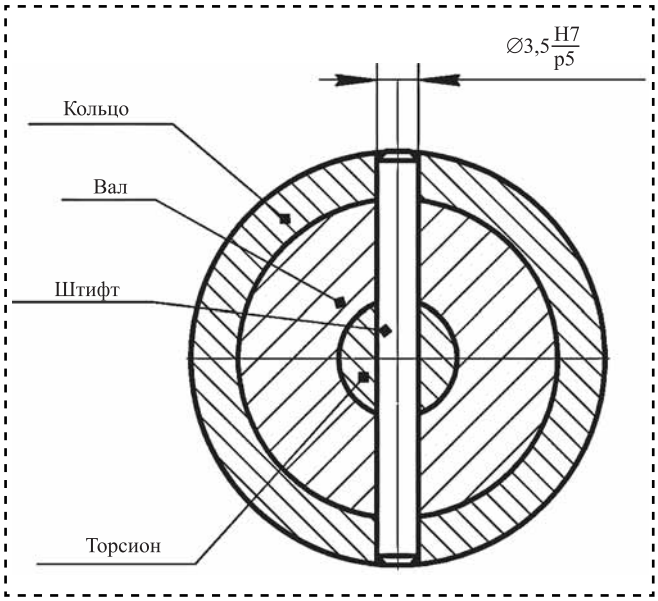


Рис. 1. Конструкция сборочного узла "вал с торсионом" ЭУР

Основная часть

Рассмотрим сборочный узел "вал с торсионом" электромеханического усилителя руля (ЭУР). Сравним базовую технологию, включающую сверление отверстия, развертывание и запрессовку штифта, и технологию, в которой развертывание заменяется дорнованием.

Одной из важнейших эксплуатационных характеристик ЭУР является его информативность, которая определяется качеством сигнала, передаваемого с рулевого колеса в электронный блок управления, и скоростью его передачи.

Качество сигнала определяется соответствием действующего крутящего момента на рулевом вале, передаваемого через штифтовое соединение, моменту на торсионе. Однако из-за технологических погрешностей и деформации штифтового соединения наблюдается упругий гистерезис при передаче момента.

Проблема уменьшения гистерезиса в штифтовых соединениях изложена в работе [1]. Было выявлено, что существенное влияние оказывают точность диаметрального размера посадочного отверстия под штифт, параметры поверхностного слоя сопрягаемых поверхностей, а также жесткость штифтового соединения.

Напряженно-деформированное состояние соединений с натягом изучалось в работах [3—5]. Основным технологическим параметром, определяющим прочность соединения с натягом, является натяг запрессовки. Чем он больше, тем выше контактное давление на сопрягающих поверхностях. Вместе с тем повышение натяга оказывает положительное влияние на прочность соединения только при упругих деформациях сопрягаемых поверхностей. Появление пластических деформаций хотя бы в одной из сопрягаемых деталей значительно снижает нагрузочную способность всего соединения. Поэтому важным параметром для обеспечения прочности соединений из нескольких деталей является наибольшее контактное давление, соответствующее возникновению пластических деформаций [4].

Особенность конструкции рассматриваемого сборочного узла состоит в том, что соединение включает кольцо, изготавливаемое из стали марки 20, рулевой вал (сталь марки 40Х) и торсион (сталь марки 60С2А). Запрессовываемый штифт изготовлен из стали марки 30ХГСА. В данной конструкции необходимо учитывать изменение не только физико-механических свойств соединения, но и наружного радиуса охватывающих деталей, так как штифт запрессовывается в поперечном сечении соединения.

На основе известных зависимостей [4, 5] получены формулы для определения максимального контактного давления, соответствующего возникновению пластических деформаций, и удельного давления контакта. Чтобы учесть все особенности соединения при выводе данных зависимостей, поверхность соединения разбивалась на шесть участков с учетом наружного радиуса и свойств материала охватываемой детали.

Исходя из того, что задача является осесимметричной, формулы приводятся для участков 1, 2 и 3. Схема сборочного узла для определения контактных давлений представлена на рис. 2.

Максимальное контактное давление, соответствующее возникновению пластических деформаций, определяется зависимостью

$$p_{\max} = \begin{cases} \dfrac{\sigma_{\text{т.кол}}}{\sqrt{3}}\left(1-\dfrac{r^2}{R^2}\right) & \text{при} \quad 0 \leqslant R \leqslant R_1; \\ \dfrac{\sigma_{\text{т.вал}}}{\sqrt{3}}\left(1-\dfrac{r^2}{R^2}\right) & \text{при} \quad R_1 \leqslant R \leqslant R_2; \\ \dfrac{\sigma_{\text{т.тор}}}{\sqrt{3}}\left(1-\dfrac{r^2}{R^2}\right) & \text{при} \quad R_2 \leqslant R \leqslant R_3, \end{cases}$$

где $\sigma_{\text{т.кол}}$, $\sigma_{\text{т.вал}}$, $\sigma_{\text{т.тор}}$ — пределы текучести материала соответственно кольца, вала, торсиона;

r — радиус штифта.

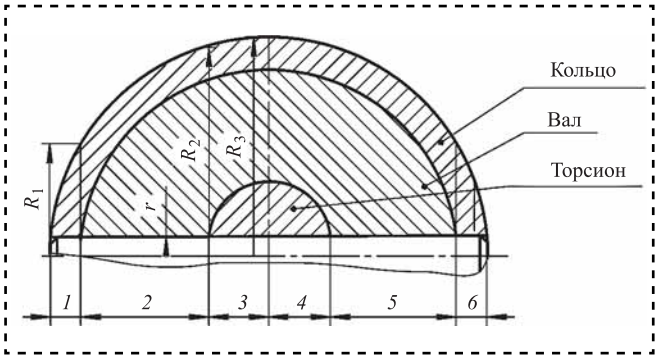


Рис. 2. Схема сборочного узла для определения НДС узла

Удельное давление контакта не должно превышать расчетное значение p_{max} и рассчитывается по формуле

$$p = \frac{N_з}{d\left(\frac{C_1}{E_1} + \frac{C_2}{E_2}\right)},$$

где $N_з$ — натяг запрессовки;

d — диаметр штифта;

C_1, C_2 — коэффициенты Ляме;

E_1, E_2 — модули упругости материала соответственно охватываемой и охватывающей деталей.

Коэффициенты Ляме определяются формулами

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

$$C_2 = \begin{cases} \dfrac{1 + \left(d/d_{кол}\right)^2}{1 - \left(d/d_{кол}\right)^2} + \mu_{кол} & \text{при} \quad 0 \leqslant R \leqslant R_1; \\ \dfrac{1 + \left(d/d_{вал}\right)^2}{1 - \left(d/d_{вал}\right)^2} + \mu_{вал} & \text{при} \quad R_1 \leqslant R \leqslant R_2; \\ \dfrac{1 + \left(d/d_{тор}\right)^2}{1 - \left(d/d_{тор}\right)^2} + \mu_{тор} & \text{при} \quad R_2 \leqslant R \leqslant R_3, \end{cases}$$

где μ_1, $\mu_{кол}$, $\mu_{вал}$ и $\mu_{тор}$ — коэффициенты Пуассона материала соответственно охватываемой детали, кольца, вала и торсиона;

d_1 — диаметр отверстия полой охватываемой детали. В данном случае $d_1 = 0$, следовательно $C_1 = 1 - \mu_1$.

На основании приведенных зависимостей определены максимальные значения давления:

в сечении 1 — 163 МПа; в сечении 2 — 448 МПа, в сечении 3 — 786 МПа.

Теоретическое удельное давление на поверхности контакта в сечении 1 соответствует 1736 Па, в сечении 2 — 1913 Па, а в сечении 3 — 1904 Па. Видно, что при запрессовке штифта пластических деформаций не возникает.

Расчет несущей способности проводился на основании положений, изложенных в работах [1, 6], и с учетом экспериментальных данных профилограмм.

Для определения фактической площади контакта используется закон распределения выступов по высоте[1, 6]

$$\psi = \frac{n_k}{n} = C\varepsilon^{\upsilon},$$

где C и υ — константы;

ε — относительное сближение поверхностей.

Для определения фактической площади контакта для всей шероховатой поверхности используем уравнение начального участка относительной опорной кривой поверхности [1, 6]

$$\eta_s = \frac{A_p}{A_c} = b\varepsilon_{max}^{\upsilon} = tm\varepsilon^{\upsilon};$$

$$\varepsilon_{max} = \frac{p}{R\,max}; \qquad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{p}{Rp},$$

где A_p — фактическая площадь контакта;

A_c — номинальная площадь контакта;

b, υ — параметры аппроксимации опорной кривой;

tm — относительная опорная длина на уровне средней линии;

p — уровень выступов относительно эквидистантной средней;

Rmax — наибольшая высота неровностей профиля (расстояние между линией выступов и линией впадин в пределах базовой длины);

Rp — высота сглаживания (расстояние от линии выступов до средней линии в пределах базовой длины).

Параметры опорной кривой b, υ и tm определяются экспериментально, поэтому опорная кривая, описываемая выражением (1), соответствует распределению материала изучаемой реальной поверхности [6].

В процессе исследований изучалось влияние точности диаметрального размера посадочного отверстия, отклонений от геометрической формы и шероховатости поверхности на эксплуатационные свойства узла. Эксперимен-

ты проводились как на образцах, так и на моделях.

Основным технологическим параметром, определяющим несущую способность и прочность соединения с натягом, является натяг запрессовки.

Для обеспечения теоретического натяга запрессовки, заданного конструкторской документацией, необходимо выполнение высоких требований точности диаметрального размера под штифт. На практике это осуществить очень сложно, так как вследствие разных физико-механических свойств материалов деталей в соединении наблюдается неравномерность точности по глубине отверстия.

Влияние вариантов обработки на точность отверстия под штифт и действительный натяг запрессовки исследовались на образцах. Исследования точности проводились статистическим методом на выборке заготовок из 20 штук.

Развертывание отверстий проводилось в учебной лаборатории с использованием вертикально-сверлильного станка мод. 2Н125А. Дорнование было выполнено на гидравлическом прессе мод. У1671.

Измерения диаметральных размеров проводились на координатно-измерительной машине ECLIPSE-ATAC в трех сечениях по глубине отверстия (рис. 3). Полученные результаты после статистической обработки представлены в табл. 1 и 2.

Исходя из значений диаметральных размеров отверстия, построены поля распределения полей допусков соединения (рис. 4), на основании ко-

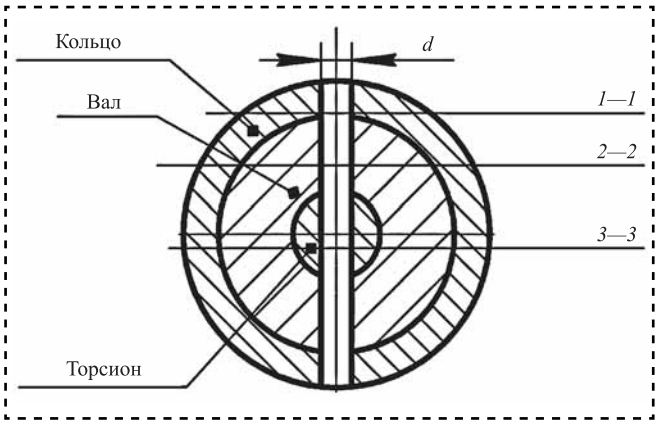


Рис. 3. Схема измерения диаметра *d* отверстия

торых можно сделать вывод, что при обработке развертыванием возможно снижение действительного натяга запрессовки вследствие несоответствия диаметрального размера отверстия требованиям точности и "разбивки" отверстия инструментом.

Поэтому при сборке необходимо применение штифтов большего диаметра для увеличения натяга запрессовки и несущей способности соединения, однако при этом значительно снижается производительность сборочного процесса. Кроме того, после обработки отверстия развертыванием наблюдается неравномерность точно-

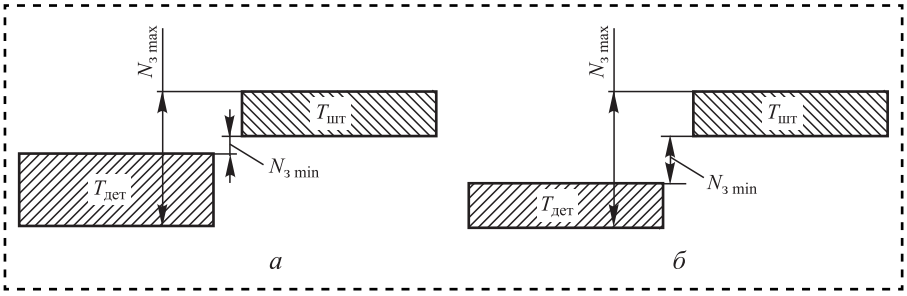


Рис. 4. Распределение полей допусков соединения при различных вариантах обработки:
а — развертывание; *б* — дорнование

Таблица 1

Статистические параметры обработки отверстий развертыванием

Параметр	После развертывания		
	Сечение 1-1	Сечение 2-2	Сечение 3-3
Средний диаметр $D_{ср}$, мм	3,5282	3,5074	3,5261
Дисперсия выборки ξ	0,000045	0,000019	0,00008
Среднее квадратическое отклонение σ	0,0067	0,0044	0,008

Таблица 2

Статистические параметры обработки отверстий дорнованием

Параметр	После дорнования		
	Сечение 1-1	Сечение 2-2	Сечение 3-3
Средний диаметр $D_{ср}$, мм	3,457	3,432	3,431
Дисперсия выборки ξ	0,00183	0,00001	0,00008
Среднее квадратическое отклонение σ	0,04275	0,00232	0,00894

Таблица 3

Результаты обработки данных отклонения формы отверстий после обработки

Отклонение формы, мм	Вогнутость		Конусообразность		Отклонения от круглости	
	Развертывание	Дорнование	Развертывание	Дорнование	Развертывание	Дорнование
Δ_{max}	0,02	0,005	0,015	0,004	0,0085	0,002
Δ_{min}	0,005	0,0025	0,005	0,0027	0,0055	0,001
$\Delta_{ср}$	0,0105	0,0031	0,0095	0,0032	0,0072	0,0018

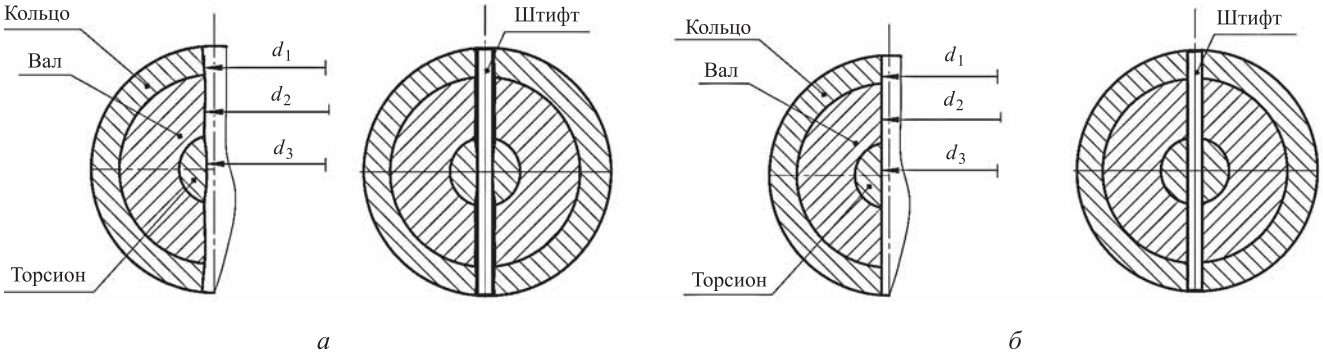


Рис. 5. Результаты обработки отверстия в сборочном узле:
а — развертывание; *б* — дорнование

сти отверстия по глубине $d_1 < d_2 < d_3$ (рис. 5). В результате снижается фактическая площадь контакта поверхностей отверстия и штифта.

При обработке отверстия дорнованием точность диаметрального размера отверстия по глубине выше ($d_1 \approx d_2 \approx d_3$), и следовательно, повышается фактическая площадь контакта поверхностей отверстия и штифта.

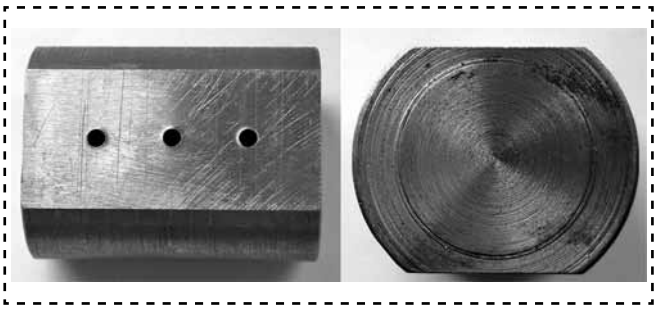


Рис. 6. Модели для исследования отклонений формы отверстий после дорнования и развертывания

Были проведены исследования параметров отклонения от круглости, бочкообразности и конусообразности отверстий после дорнования и развертывания. Исследования проводились на моделях, которые представлены на рис. 6.

Предварительной обработкой было сверление отверстия d = 8,1 мм, затем проводились развертывание и дорнование образцов в размер d = = 8,2 мм. Схемы измерений представлены на рис. 7.

На рис. 8, 9 представлены диаграммы экспериментальных данных.

Отклонение формы отверстия определялось по формуле

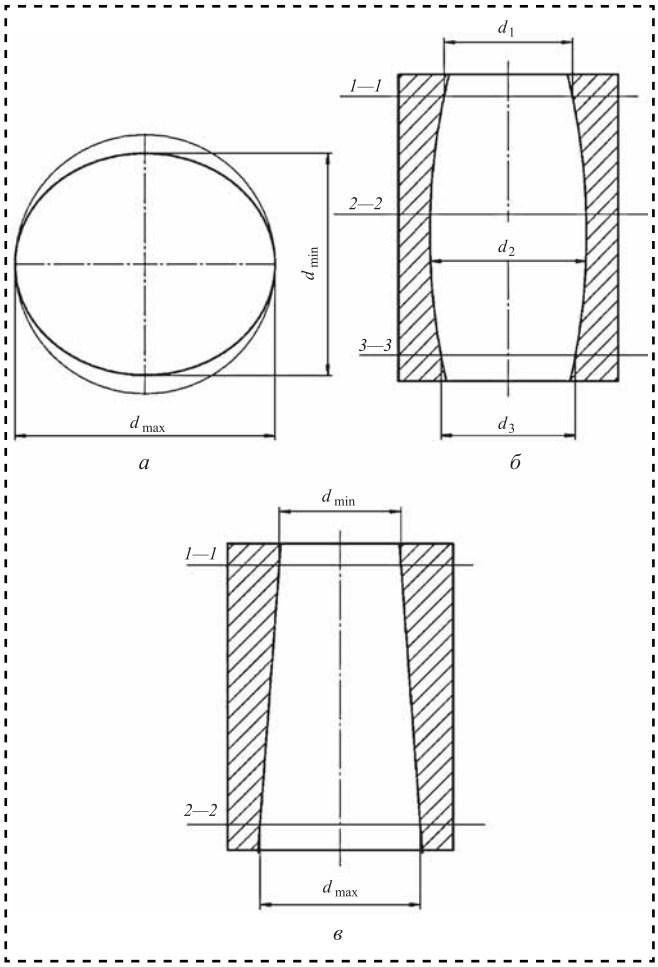


Рис. 7. Схема измерения отклонения поверхности отверстия:
а — от круглости; *б* — седлообразности; *в* — конусообразности

$$\Delta = (d_{max} - d_{min})/2,$$

где d_{max}, d_{min} — наибольший и наименьший диаметры отверстия соответственно.

Проведенные исследования показали, что обработка отверстий дорнованием обеспечивает меньшие значения отклонений формы, чем развертывание.

Для определения параметров кривой опорной поверхности и значения шероховатости поверхности отверстия были записаны профилограммы после обработки отверстий образцов развертыванием и дорнованием. Формы профилограмм представлены на рис. 10. Видно, что дорнование в большей степени исправляет дефекты предварительной поверхности. После обработки площадки на выступах микрогребешков увеличиваются, а впадины становятся менее глубокими и более узкими.

Для построения опорных кривых использовались методика и формулы, приведенные в работе [6]. Относительное сближение на данном уровне определяется по формуле

$$\varepsilon_i = \frac{a_i}{H_{max}},$$

где a_i — уровень (сближение) на данном уровне;

H_{max} — максимальная высота микронеровностей.

Относительная опорная длина профиля на данном уровне имеет вид

$$\eta_{si} = \frac{\Sigma \Delta l_i}{l},$$

где Δl_i — сумма длин отрезков на данном уровне;

l — общая длина.

Формула (1) для начального участка относительной опорной кривой профиля справедлива в диапазоне $0 \leqslant \eta_s \leqslant 0{,}5$.

Параметры аппроксимации начальной части опорной кривой можно найти в результате решения системы двух уравнений, взятых для некоторых двух значений сближения в двух сечениях [6]:

$$\lg \eta_{s1} = \lg b + \nu \lg \varepsilon_1;$$
$$\lg \eta_{s2} = \lg b + \nu \lg \varepsilon_2,$$

откуда

$$\nu = \frac{\lg \eta_{s2}/\eta_{s1}}{\lg \varepsilon_2/\varepsilon_1} = \frac{\lg \Sigma l_2/\Sigma l_1}{\lg \varepsilon_2/\varepsilon_1}; \quad (2)$$

$$\lg b = \lg \eta_{s1} - \nu \lg \varepsilon_1. \quad (3)$$

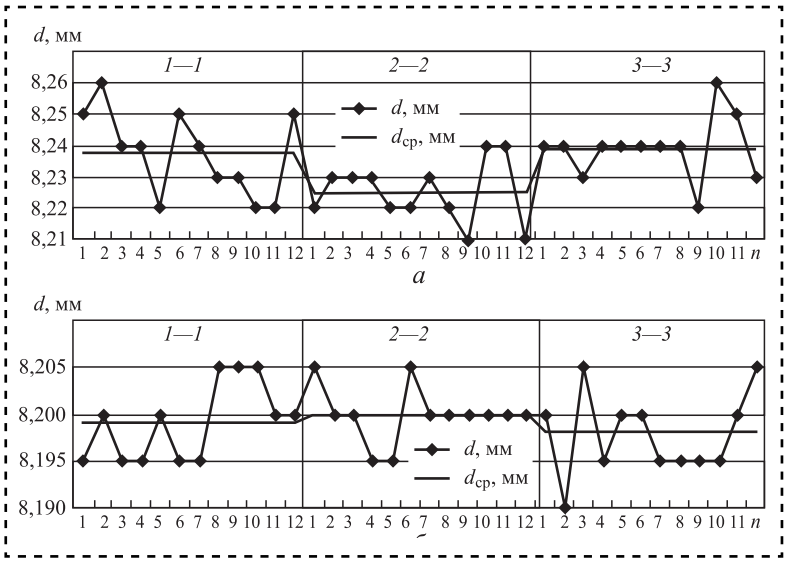


Рис. 8. Диаграммы седлообразности поверхности отверстия:
а — после развертывания; *б* — после дорнования

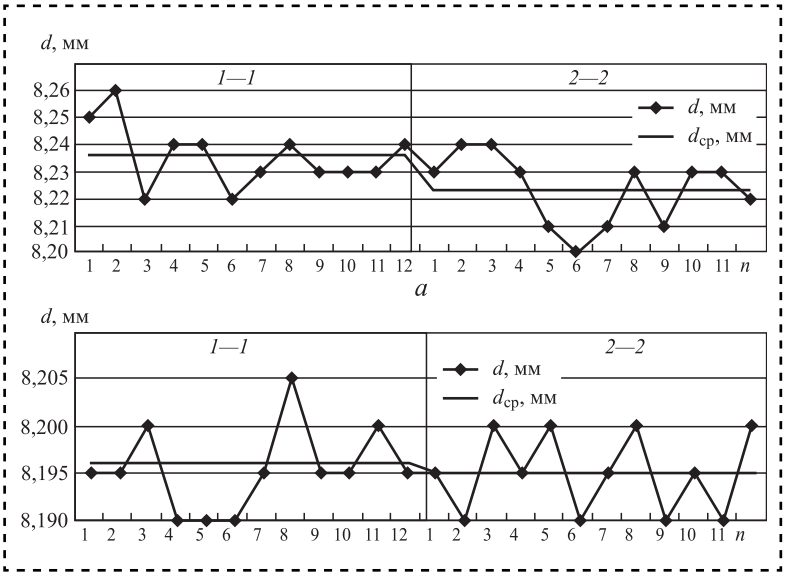


Рис. 9. Диаграммы конусообразности поверхности отверстия:
а — после развертывания; *б* — после дорнования

Наиболее целесообразно определять параметры аппроксимации начальной части опорной кривой при следующих группах сближения [6].

Группа 1:

а) $\varepsilon_1 = 0{,}05$; $\varepsilon_2 = 0{,}2$;

б) $\varepsilon_1 = 0{,}1$; $\varepsilon_2 = 0{,}3$;

в) $\varepsilon_1 = 0{,}2$; $\varepsilon_2 = 0{,}3$.

Группа 2:

а) $\varepsilon_1 = 0{,}05$; $\varepsilon_2 = 0{,}1$;

б) $\varepsilon_1 = 0{,}05$; $\varepsilon_2 = 0{,}2$;

в) $\varepsilon_1 = 0{,}1$; $\varepsilon_2 = 0{,}2$.

Замерив при каждом из этих сближений $\Sigma\Delta l$ и подставив эти значения в формулы (2), (3), можно найти для каждой пары величину сближения ν_1, ν_2, ν_3 и b_1, b_2, b_3. Расчетные значения определяются как среднее арифметическое из этих значений [6]:

$$\nu = \frac{\nu_1 + \nu_2 + \nu_3}{3};\ b = \frac{b_1 + b_2 + b_3}{3}.$$

Группу 1 сближений следует применять при монотонном увеличении площади с увеличением сближения. Если же при $\varepsilon = 0{,}3$ $\eta = 0{,}5$, то для определения ν и b следует использовать группу 2 сближений.

После обработки профилограмм были получены результаты, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Результаты обработки данных профилограмм

Вариант обработки	R_z, мкм	R_{max}, мкм	b	υ
Развертывание	1,6	1,8	2,17	2,149
Дорнование	0,6	0,85	4,77	0,943

На основании полученных данных построены кривые опорной поверхности после дорнования поверхности отверстия и развертывания (рис. 11).

Таким образом, после обработки дорнованием поверхность отверстия обладает наиболее благоприятными параметрами опорной поверхности, чем после обработки развертыванием.

Для определения влияния вида механической обработки на эксплуатационные характеристики штифтового соединения сборочного узла ЭУР были проведены испытания образцов на гистерезис.

Для обеспечения высокой информативности необходимо, чтобы запаздывание сигнала, передаваемого через сборочный узел "вал с торсионом", было минимальным, поэтому при изготовлении к узлу предъявляются требования, ограничивающие значения гистерезиса преобразовательной характеристики торсиона, который не должен превышать 3′50″.

Явление гистерезиса в соединении проявляется в несоответствии момента на рулевом вале углу закручивания торсиона. Чем больше это несоответствие, тем шире петля гистерезиса. Типовой график гистерезиса штифтового соединения представлен на рис. 12 [1].

Были проведены испытания сборочных узлов со штифтовым соединением, в которых отверстие было обработано развертыванием и дорнованием, а также с применением совмещенной технологией дорнования и запрессовки. Испытания сборочного узла проводились на стенде МА01-544 для проверки угла скручивания торсиона усилителя рулевого управления. Вал

Рис. 10. Профилограммы поверхностей отверстий:
а — после развертывания; *б* — после дорнования

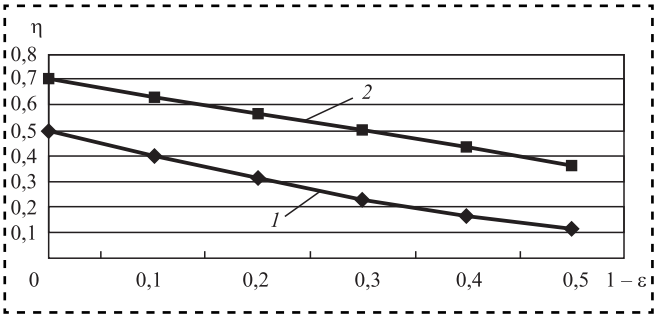


Рис. 11. Кривые опорной поверхности после развертывания (*1*) и дорнования (*2*)

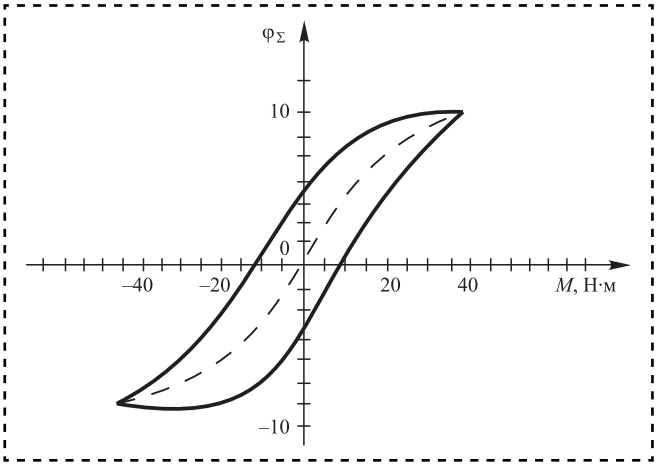


Рис. 12. Зависимость угла закручивания торсиона от момента на рулевом вале

сборочного узла устанавливают в шлицевое отверстие и зажимают, перемещая рукоятку ручного пневмораспределителя. Затем к сборочному узлу прилагают крутящие моменты, фиксируя при этом значения гистерезиса. Параметры отражаются на цифровой индикации ЛИР-510.

Результаты испытаний образцов на гистерезис:

при развертывании и запрессовке штифта ∅3,5 — 4′04″—4′48″;

при дорновании и запрессовке штифта ∅3,495 — 3′46″—3′50″;

при дорновании и запрессовке штифта ∅3,5 — 3′00″—3′10″.

Таким образом, при развертывании отверстия и дальнейшей запрессовке штифта гистерезис превышает требуемые значения, в то время как применение при испытаниях дорнования и запрессовки штифта обеспечивает выполнение требований значения гистерезиса.

Выводы. Применение дорнования в качестве отделочной обработки отверстия малого диаметра сборочного узла ЭУР обеспечивает высокую размерную точность диаметрального размера отверстия по глубине после обработки. В результате повышается фактическая площадь контакта поверхностей отверстия и штифта.

Проведенные исследования параметров отклонения формы отверстий после обработки развертыванием и дорнованием выявили, что дорнование позволяет достигнуть наименьших значений отклонения формы отверстия. После обработки дорнованием наблюдаются не только низкая шероховатость обработанной поверхности отверстия, но и благоприятные параметры опорной поверхности. Кроме того, отмечается положительное влияние применения дорнования на снижение гистерезиса преобразовательной характеристики торсиона, который является основной эксплуатационной характеристикой узла.

Библиографический список

1. **Домбровская М.М.** Жесткость штифтовых и шпоночных соединений вала и втулки. Л.: Изд. ЛГУ, 1973. 112 с.

2. **Скворцов В.Ф., Арляпов Ф.Ю.** Дорнование глубоких отверстий малого диаметра. Томск: Изд-во ТПУ, 2005. 92 с.

3. **Янченко И.И., Тарасов В.В., Сивцев Н.С.** Технологические основы обработки точных отверстий дорнованием: в 2-х ч. Ижевск: Изд. ИПМ УрО РАН, 2002. Ч. 1: Теория управления контактно-кинематическими условиями при дорновании. 138 с.

4. **Берникер Е.И.** Посадки с натягом в машиностроении: справ. пособие. М.: Машиностроение, 1966. 167 с.

5. **Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А.** Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление. М.: Машиностроение, 1981. 247 с.

6. **Демкин Н.Б., Рыжов Э.В.** Качество поверхности и контакт деталей машин. М.: Машиностроение, 1981. 244 с.

ООО "Издательство "Инновационное Машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство 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 20.08.2015. Подписано в печать 07.10.2015. 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.