

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

9 2008
(98)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

- Ковалёв В.Г., Ковалёв С.В., Коновалов В.А. Электрический монтаж накруткой 3
- Барабанов А.Б. Обоснование наилучшего варианта сборки комплектов инструмента для станков с ЧПУ 11

Сборочное оборудование и его элементы

- Кристалль М.Г., Харькин О.С., Дроботов А.В. Оценка производительности струйного разделения потоков деталей 14

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

- Чебанов В.С., Башуров Б.П. Методы диагностирования, оценка технического состояния оборудования систем судовых дизелей при эксплуатации и средства мониторинга отказов 18

Разборка. Ремонт

- Тарасенко Ю.П., Царева И.Н., Бердник О.Б., Фель Я.А. Ремонтно-восстановительная технология с применением плазменных покрытий для лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов 23
- Техническое обслуживание оборудования. *Продолжение* 28

Подготовка специалистов

- Стольников С.П., Подлеснов В.Н. Подготовка специалистов в области технологии ремонта оборудования 34

Информация

- Черепяхин А.А., Виноградов В.М., Смирнова Э.Е. Выбор СОЖ для высокоскоростного протягивания наружных фасонных поверхностей 37

Нормативная документация

- Методические указания по балансировке жестких роторов (к ГОСТ 22061-76 "Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения"). *Продолжение* 42

Изобретения и патенты

- Земляков Н.В. Стопорение болта в глухом отверстии корпуса 51

Соединения деталей машин

- Крайнев А.Ф. Подвижные соединения и уплотнения (функциональная целесообразность и технологичность) 2-я, 3-я стр. обложки

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

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

Региональные редсоветы

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Н.М. КУЩ-ЖАРКО, О.Н. ЛУТОВИНИНА,
Л.В. САВЕЛЬЕВА

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

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.: (495) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (495) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru

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

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

THE MONTHLY
NEWSMAGAZINE
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

9 2008
(98)

CONTENTS

Modern Technologies in Assembly

- Kovalev V.G., Kovalev C.V., Konovalov V.A. Electric mounting twist 3
Barabanov A.B. The validation of the best tool set choice for NC machines 11

Assembly Equipment and its Elements

- Kristal M.G., Kharkin O.S., Drobotov A.V. Estimation of productivity of the parts streams jet separation 14

Quality Assurance. Testing. Monitoring

- Chebanov V.S., Bashurov B.P. The methods of technical condition diagnostics of ship diesels in operation and monitoring facilities 18

The Dismantling. Repair

- Tarasenko Y.P., Tsareva I.N., Berdnik O.B., Fel Ya.A. Repair and recover technology for gas-turbine engines blades of gascompressor units using plasma coating 23
Servicing of equipment. A prolongation 28

Preparation of Experts

- Stolnikov S.P., Podlesnov V.N. Preparation of experts in the field of technology of repair of the equipment 34

Information

- Cherepahin A.A., Vinogradov V.M., Smirnova E.E. Choice lubricating and cooling liquids for high-speed broaches external shaped surfaces 37

Command Papers

- Methodical directions by balance of rigid rotors (on the GOST 22061-76 Machines and technological equipment. Balance quality grade system. General). A prolongation 42

Inventions and Patents

- Zemlyakov N.V. Latching of the bolt in the indistinct aperture of the case. The review of patents 51

Connections of Details Machines

- Kraïnev A.F. Mobile connections and condensations (functional expediency and adaptability to manufacture) 2-nd, 3-d pp. of cover

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

Editors

MOSCOW

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

MEDAR' A.V.
MIKRIN E.A.
NAZAROV Yu.F.
POROSHIN V.V.
RUMIANTSEVA O.N.
SHANDROV B.V.
SHATILOV A.A.
KHOLODKOVA A.G.
YARKOV G.A.

Regional editors

ASTRACHAN

MIKITIANSKI V.V.

BELGOROD

PELIPENKO N.A.

BRIANSK

GORLENKO O.A.

VLADIVOSTOK

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

VOLGOGRAD

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

IZHEVSK

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

KAZAN

ADGAMOV R.I.

KOVROV

ZHITNIKOV Yu.Z.

KOLOMNA

AMIROV Yu.D.

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

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

NABEREZHNYE CHELNY

DMITRIEV S.V.
KHISAMUTDINOV R.M.

OMSK

KOSTIUKOV V.N.

OREL

STEPANOV Yu.S.
KHARLAMOV G.A.

ORENBURG

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

RYBINSK

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

SAMARA

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

ST.-PETERSBURG

KUZMIN V.F.
SHALOBAEV E.V.

TOLIATI

KHAZOV B.F.
RYZHKOV A.I.

KHABAROVSK

LASHKO V.A.

Ukraine

KIEV

ZENKIN A.S.
MATVIENKO V.A.

DONETSK

MIKHAILOV A.I.

SEVASTOPOL

PERVUKHINA E.L.

KHARKOV

ARPENTIEV B.M.

Belarus

MINSK

BASINJUK V.L.

GOMEL

STARZHINSKI V.E.

POLITSK

KHEIFETZ M.L.

Executive editors of current issue:

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

The journal is registered by RF Ministry of Press, Tele-and Broadcasting and Mass Communications Media.
Registration certificate ПИ № 77-1747,
February 25, 2000 Free price

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency 79748, the union catalogue "Pressa Rossii" 84967, the catalogue "Pochta Rossii" 60257) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (495) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (495) 269-48-97.
<http://www.mashin.ru> E-mail: sborka@mashin.ru
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building" 107076, Moscow, Stromynsky per. 4
The reference to the *Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal* during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Электрический монтаж накруткой

Представлены данные для определения расчетных параметров проектируемых процессов и технологического оснащения электромонтажа методом накрутки на основе процессов пластического деформирования металлов.

Present data for definition designed parameter project process and technological equipment electric mounting twist on base plastic warping metal.

Ключевые слова: накрутка, радиус, натяжение, площадь контакта, точка контакта, витки, мощность.

Key words: twist, radius, tension, square, contact point, coil, power.

Электромонтаж накруткой используют для получения электрических соединений с помощью одножильных проводов и штырей-выводов. Он был разработан в начале 50-х годов в США и применяется для электрического монтажа блоков, панелей и рам. Его достоинства:

- ◆ исключение нагрева, припоев и флюсов;
- ◆ повышение надежности соединений по сравнению с паяными при механических и климатических воздействиях;
- ◆ ускорение процесса электрического монтажа аппаратуры;
- ◆ создание условий для его автоматизации;
- ◆ экономичность.

Контактное соединение накруткой – это соединение неизолированного провода (или участка изолированного провода без изоляции) с выводом, имеющим острые кромки, при котором провод навивают на вывод с определенной силой. Электрическое соединение возникает в местах контакта провода с острыми кромками вывода. Натяжение провода при накрутке разрушает пленку оксидов на контактирующих металлах, способствует вдавливанию провода в острые кромки вывода и образованию газонепроницаемого соединения.

Возможно соединение накруткой с применением провода с тонкой изоляцией. В этом случае изоляция прорезается острыми кромками вывода. Концентра-

ция напряжения в зонах контакта обуславливает взаимную диффузию металлов. Соединение накруткой должно удовлетворять следующим требованиям:

- минимальные номинальное и переходное сопротивление;
- газонепроницаемость, исключая коррозию;
- сумма площадей зон контакта с выводом должна быть больше поперечного сечения провода;
- электрическая стабильность во времени при механических и климатических воздействиях.

Эти требования обеспечивают выбором соответствующих материалов вывода и провода, конструкцией соединения и технологическими условиями его получения. Материал провода должен обладать достаточной пластичностью для образования поверхностей контакта в результате деформирования его на острых кромках вывода. Необходима определенная упругость и прочность вывода для сопротивления его скручиванию в процессе накрутки провода. От состояния поверхностного слоя материала зависят электрические параметры соединения.

Для изготовления выводов применяют медные сплавы с твердостью 95...220 HV, латунь, плакированную сталь, никелево-серебряные сплавы, бериллиевую и фосфористую бронзы. Последние имеют наилучшие физико-механические свойства:

- высокий модуль упругости;
- низкое остаточное напряжение;
- коэффициент линейного расширения, близкий к коэффициенту линейного расширения медного провода.

Для предохранения поверхности от окисления на выводы наносят покрытия, которые способствуют процессу диффузии металлов и минимизируют значения переходного сопротивления.

Выводы из латуни и бронзы, предназначенные для специальной электронной аппаратуры, покрывают гальваническим золотом с предварительным серебрением. Применяют серебрение по никелевому покрытию. Для обычной аппаратуры выводы получают из меди с покрытием оловом или спла-



вом олово–свинец толщиной не более 35...40 мкм. Отклонение осей базовых отверстий от узлов сетки не должно быть более $\pm 0,1$ мм.

Для накрутки используют медный одножильный провод, имеющий относительное удлинение не менее 15 % и предел прочности не менее 96 МПа. Рабочий участок провода освобождают от изоляции и обслуживают. Кроме меди используют латунь, никелевое железо и никелевую проволоку.

Для обеспечения качества соединения элементов необходимо, чтобы сумма площадей контакта провода с выводом превышала или была равна площади поперечного сечения провода. Это обеспечивают 16–20 точками контакта в зависимости от диаметра провода. Следовательно, соединение должно быть многovitковым.

Следует указать, что соединение, состоящее из 5–6 витков луженого медного провода, накрученного на вывод из фосфористой бронзы с золотым или серебряным покрытием, имеет номинальное сопротивление 0,001...0,003 Ом. После электрических, механических и климатических испытаний оно увеличивается не более чем на 0,001 Ом. Переходное сопротивление контакта в месте накрутки не должно быть более 0,004 Ом.

Большое значение в обеспечении электрической и механической стабильности соединения имеет процесс диффузии контактирующих металлов, сопровождающий накрутку.

Механическое напряжение в навитом проводе снижается в процессе эксплуатации на 20...50 % в зависимости от температурного воздействия. Диффузия металлов покрытия увеличивает механическую прочность и обеспечивает сохранение электрических параметров соединения во времени. Срок службы соединения накруткой при нормальных климатических воздействиях составляет 15–20 лет.

Для накрутки применяют одножильный провод диаметром 0,17...1,2 мм. Провод большего диаметра требует увеличения силы натяжения и использования более прочных выводов.

Вывод должен иметь минимум три острые кромки. В соответствии с этим условием применяют выводы с квадратной, прямоугольной, ромбовидной, двойной треугольной, V-образной и U-образной формой поперечного сечения.

Наибольшее распространение получили квадратные и прямоугольные выводы, причем квадратные предоставляют ряд преимуществ при автомати-

зации монтажа накруткой. U-образные и V-образные выводы обладают большей упругостью по сравнению с прямоугольными при одинаковой площади поперечного сечения. Их применяют в ламповых панелях и реле, а также для монтажа аппаратуры, работающей при температуре 120...180 °С. При такой температуре напряжение в проводе в течение 3 ч снижается вдвое, а упругий контакт вывода с проводом позволяет сохранить электрические и механические параметры соединения.

Для обеспечения сопротивления скручиванию при накрутке площадь поперечного сечения вывода должна быть в 1,5 раза больше площади сечения провода. Обычно отношение диаметра жилы провода к стороне квадратного вывода составляет 0,5...0,6, а к стороне прямоугольного вывода 0,3...0,5. Отношение сторон вывода прямоугольного сечения должно быть не более 1:3. Радиусы острых кромок выводов по покрытию – 0,05...0,08 мм, параллельность сторон – 0,025 мм на длине 10 мм, отклонение от плоскостности – не более 0,25 мм, отклонение от прямолинейности поверхности вывода – не более 0,1 мм на всей длине вывода. Ширина малой стороны вывода должна быть не меньше диаметра провода.

Длина вывода составляет 12...38 мм и определяется:

- ♦ диаметром провода;
- ♦ числом витков в соединении;
- ♦ количеством соединений на выводе.

Чтобы обеспечить оптимальное число контактных поверхностей с площадью газонепроницаемых участков, превышающей площадь поперечного сечения провода, соединение накруткой должно иметь от четырех до восьми витков для проводов диаметром 0,2...1,2 мм. При расчете числа витков следует учитывать, что вывод квадратной, прямоугольной и ромбовидной форм сечения имеет четыре точки контактирования на виток, V-образной и треугольной – три, U-образной – 2,5. Две первые и две последние точки контакта на первом и на последнем витках не дают надежного соединения. Поэтому число эффективных зон контакта с выводом определяют как сумму всех точек соприкосновения накрученного провода за вычетом четырех.

Соединение накруткой должно быть самозапирающимся, чтобы провод не мог сойти с вывода. Осесимметричные поперечные сечения (круглые или имеющие в поперечном сечении эллипс) не подходят для выводов с этой точки зрения. Самоза-



пирание обеспечивается за счет упругих деформаций разгрузки контактирующих элементов: проводник, растягиваемый при накрутке, в процессе разгрузки уменьшается по длине и охватывает вывод, а сжимаемый в поперечном сечении вывод при разгрузке увеличивается по ширине и при этом увеличивает контактное напряжение в проводе. После прекращения накрутки у одного из углов вывода провод должен касаться его, а чтобы он не отходил от другого угла, положение его должно быть зафиксировано. Провод при этом самоблокируется от раскрутки.

При монтаже накруткой применяют три вида соединений: обычное (немодифицированное), модифицированное и бандажное (рис. 1). *Немодифицированное* соединение получают путем навивки на вывод неизолированного участка одножильного провода. *Модифицированное* соединение отличается от немодифицированного наличием 1–2 витков изолированного провода. Изоляция снижает вероятность поломки первого витка провода при механических воздействиях (вибрации, смещении вывода) за счет уменьшения концентрации напряжения в точках контакта. Но габариты такого соединения увеличиваются по сравнению с обычными. Поэтому, когда шаг выводов для накрутки становится меньше 2,5 мм, применение модифицированного соединения становится затруднительным.

Бандажное соединение состоит из нескольких витков бандажного провода. Провод при накручивании захватывает и обжимает вывод.

Наибольшее применение нашло модифицированное соединение, особенно в аппаратуре, подвергающейся механическим воздействиям. При малом шаге между выводами и больших сечениях монтажного провода применяют обычное соединение накруткой.

Бандажное соединение рекомендуют для образования контактных соединений с выводами навесных элементов, шинами питания и при использовании для монтажа многожильных проводов, не пригодных к накрутке.

Выводы следует закреплять в панели впрессовыванием, завинчиванием или пайкой так, чтобы они прочно, без повреждений сопротивлялись возникающему во время накрутки крутящему моменту, а в дальнейшем — различным механическим нагрузкам.

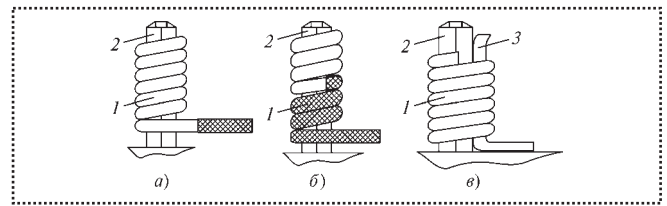


Рис. 1. Виды соединения проводов методом накрутки:

a — немодифицированное соединение; *б* — модифицированное соединение; *в* — бандажное соединение; 1 — проводник; 2 — вывод; 3 — бандажируемый элемент

Надежность соединений тем больше, чем больше прочность штырей на скручивание, так как это увеличивает контактное сжимающее напряжение.

Во время накрутки провода давление, возникающее на контактирующих поверхностях, достигает величины предела текучести ~ 700 МПа. Вследствие пластической деформации это давление непосредственно после накрутки провода снижается (приблизительно до 200 МПа) и становится постоянным. Соединение может ослабиться и дальше за счет явлений релаксации (в данном случае холодной текучести). Испытания на долговечность показывают, что в соединениях накруткой давление не опускается ниже 50 % от исходного состояния спустя годы. И такое давление контактирующих поверхностей достаточно для обеспечения необходимой постоянной величины высокой проводимости.

Если на штыре выполняют не одну, а три накрутки, каждая из последующих накруток ослабляет предыдущую на 10...20 % при малой жесткости вывода. Если соотношение размеров поперечного сечения вывода и диаметра провода и пластичность провода выбраны неправильно, первая (нижняя) накрутка может оказаться настолько ослабленной, что сойдет с вывода. Но и при правильном выборе соотношения размеров первая накрутка ослабляется из-за деформации вывода второй накруткой на 20 %, третьей накруткой — на 30 %. Но оставшиеся напряжения, удерживающие на выводе первую накрутку, достаточны для обеспечения прочности и надежности соединения. Общее сечение подсоединенных проводов не должно превышать площади поперечного сечения вывода.

Процесс накрутки состоит из следующих операций:

- выбор наматывающего ролика, соответствующего конфигурации вывода и размеру провода;
- нарезка провода заданной длины;



- укладка провода разной длины в соответствующие ячейки кассы;
- очистка провода от изоляции на заданной длине;
- установка провода в отверстие наматывающего ролика на глубину, определяемую длиной очищенного от изоляции провода;
- изгиб провода вокруг втулки оправки так, чтобы он не закрывал отверстие, предназначенное для вывода, свободный конец провода придерживают;
- нахождение адреса вывода, с которого начинается цепь соединений, по таблице соединений;
- насаживание оправки с проводом на вывод, соответствующий началу цепи, и включение вращения наматывающего ролика;
- нахождение второго адреса цепи, прокладывание провода между выводами по направлению ко второму адресу, и повторение операции накрутки.

Время накрутки составляет ~1 с, после чего наматывающий валик снимают с вывода. Продолжительность всей операции (введение провода, его изгиб, насаживание на вывод, включение вращения, остановка, снятие инструмента) около 2,5 с. Поэтому, если провода для накрутки уже подготовлены и разложены по ячейкам кассы, производительность накрутки составляет 1000–1400 соединений в час.

Производительность **ручной** подготовки провода даже при наличии соответствующих инструментов для снятия изоляции и нарезки на нужную длину ниже в 3–4 раза. Подготовка проводов **на автоматах** совпадает по производительности с ручной накруткой (1500 проводов в час). Считывание информации с таблиц отвлекает оператора и резко снижает производительность накрутки. Поэтому в серийном производстве адреса накруток и проводов в кассе надиктовывают оператору с магнитофона. Заодно чтение адресов накладывают на музыку или радиопостановки, чтобы скрасить оператору монотонность его труда.

При **полуавтоматическом** монтаже используют программу, которая помогает находить вывод с помощью сигнальных ламп, числовых индикаторов или координатным позиционированием, т.е. подводом инструмента к нужному выводу. В соответствии с программой управления стол и каретка двигаются таким образом, что центральное отверстие наматывающего валика точно попадает в предназначенный для очередного соединения вывод. Монтажник только насаживает наматываю-

щий валик на вывод и, приведя инструмент в действие, производит соединение. Движение каретки к очередному адресу также запрограммировано на прокладывание провода по назначенному пути. Очередной провод соответствующей длины высвечивается сигнальной лампой в кассе проводов.

При автоматическом монтаже на автоматических линиях производится нарезка проводов, очистка от изоляции и накрутка провода на штыри по заданной программе. В современном производстве необходимость в больших объемах соединений накруткой исчезла, поэтому автоматические линии соединений накруткой постепенно выводятся из производства.

Сегодня накрутка широко используется для реализации переменной части монтажа на унифицированных платах, когда нужно создавать модификации изделий за счет добавления связей к общей для всех модификаций массе соединений. Доля соединений, добавляемых накруткой, в этом случае не превышает 10 %.

Соединения накруткой хорошо сочетаются с технологией впрессовывания штырей в отверстия. Тогда монтаж вообще обходится без процессов пайки или сварки. Крупные коммутационные блоки и стойки аппаратуры связи монтируются именно таким образом.

Следовательно, процесс накрутки состоит в наматывании с определенной силой на вывод из прочного материала с острыми кромками проводника из мягкого материала. При этом получают прочноплотное герметичное соединение штыря с проводником, заменяющее электромонтажную пайку, а витки провода, врезаясь в вывод, закрепляются на углах вывода. Процесс врезания провода в вывод сопровождается пластическим деформированием. При неправильно выбранных режимах, достигающих предельной величины, возможно ухудшение проводимости соединения (так как пластическое деформирование токопроводящего материала сопровождается увеличением электрического сопротивления). Процесс накрутки выполняют не только быстрее ручной пайки: его легко механизировать и автоматизировать, при этом получают более прочное соединение.

В процессе электромонтажа методом накрутки (рис. 2, а) возникают следующие силовые и деформационные процессы. Провод 1 без усилия свободно вытягивают из бокового отверстия 2 наматывающего валика 3 и изгибают на тороидальной

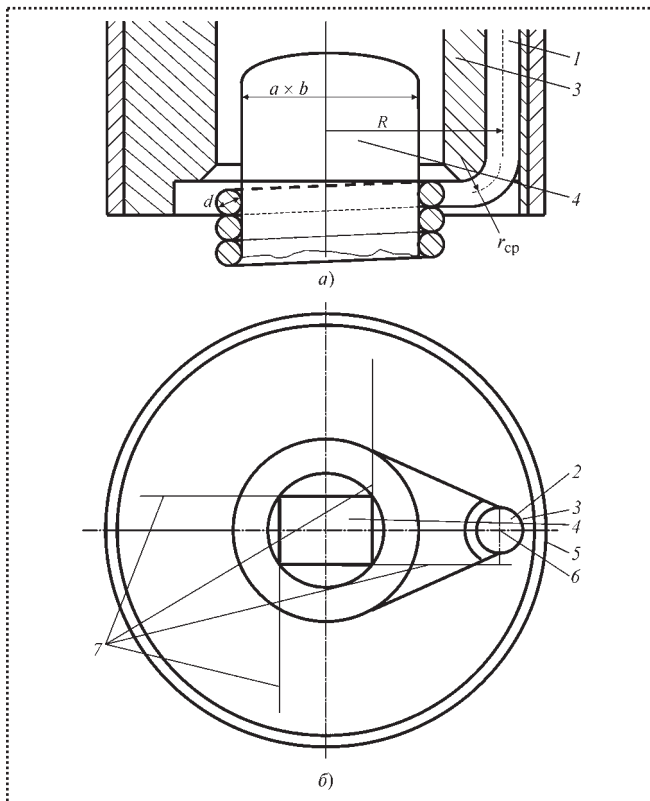


Рис. 2. Схема электро монтажа методом накрутки:

a – осевой разрез; b – вид снизу (без проводника); 1 – проводник; 2 – отверстие для проводника; 3 – наматывающий валик; 4 – вывод; 5 – втулка; 6 – ось бокового отверстия наматывающего валика; 7 – линии продолжения сторон вывода; d – диаметр наматываемого проводника; r_{cp} – средний радиус изгиба провода; R – радиус накрутки; a, b – размеры поперечного сечения вывода

кромке с радиусом r наматывающего валика. Затем снова выпрямляют при сходе с него и изгибают под углом 90° на каждом ребре вывода 4 при вращении наматывающего валика 3 вокруг оси этого вывода. При этом в наматываемый провод врезаются острые кромки вывода 4 под действием растягивающей осевой силы накрутки. Так как в проводе при изгибе возникают осевые растягивающие и, как их следствие, контактные напряжения между проводником и наматывающим валиком, то возникают силы трения на тороидальной поверхности наматывающего валика и проводника.

Контакт острых кромок вывода начинается с того момента, когда ось бокового отверстия наматывающего валика при накрутке смещается с линии 7 (см. рис. 2, б), являющейся продолжением стороны вывода. Составляющая силы натяжения провода, параллельная стороне вывода, увеличива-

ется от нуля до максимальной величины при подходе оси бокового отверстия наматывающего валика к линии продолжения стороны вывода. Вторая составляющая, перпендикулярная ей, увеличивается от нуля до максимальной величины при совпадении оси бокового отверстия наматывающего валика с осью симметрии вывода, а затем уменьшается до нуля при совпадении оси бокового отверстия наматывающего ролика с линией продолжения стороны вывода. Если первая составляющая обеспечивает врезание вывода в провод, то вторая составляющая прижимает проводник к выводу, а ее увеличение способствует пластическому деформированию смятием проводника в месте контакта его с выводом, и увеличению поверхности контакта.

Силовые параметры процесса накрутки. При выходе прямого проводника из бокового отверстия наматывающего валика провод изгибается на границе радиуса r с тороидальной поверхностью. Дальнейшее перемещение проводника по тороидальной поверхности происходит с преодолением только сил трения без изменения кривизны срединного сечения проводника в меридиональном сечении. А на границе криволинейного с прямолинейным участком наматывающего валика при спрямлении проводника возникает растягивающее меридиональное напряжение. Его величину определим приближенно на основе равенства работ внешних и внутренних сил [1]. Согласно этому работа изгибающего момента M на угле поворота γ сечения должна быть равна произведению напряжения $\Delta\sigma$ в нем на площадь сечения заготовки и пути перемещения элемента заготовки. При перемещении элемента заготовки (рис. 3) из положения 1 в положение 2 условие равенства работ может быть следующим:

$$\Delta\sigma dr_{cp} d\gamma = M d\gamma, \quad (1)$$

откуда

$$\Delta\sigma = \frac{M}{dr_{cp}}, \quad (2)$$

где $r_{cp} = r + d/2$ – радиус рабочей кромки наматывающего валика, r должен быть не менее 2–4 диаметров d проводника.

Величина момента M зависит от величины меридионального напряжения σ и уменьшается с его увеличением. Однако установлено [1], что даже при

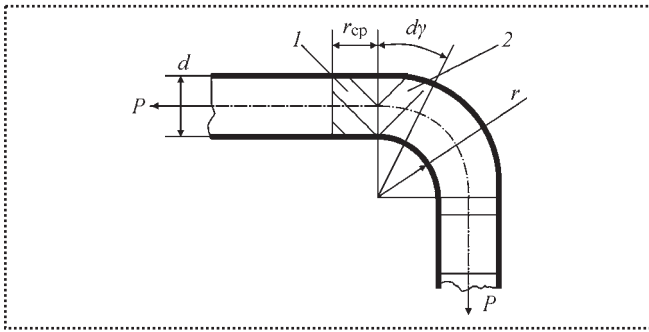


Рис. 3. Схема перемещения деформируемого элемента на скругленной кромке для определения приращения напряжения натяжения при изгибе:

P – сила напряжения провода

значительных значениях σ величина изгибающего момента уменьшается незначительно по сравнению с моментом чисто пластического изгиба. Считаем, что при изгибе проводника на наматывающем валике происходит пластическое деформирование. Величина изгибающего момента чисто пластического изгиба [1] равна

$$M = \frac{\sigma_s d^2}{4}. \quad (3)$$

После подстановки значения момента в формулу (2) получим

$$\Delta\sigma = \frac{\sigma_s d}{4r_{\text{ср}}}. \quad (4)$$

Таким образом, изменение кривизны провода под действием момента в зоне сопряжения прямолинейного и криволинейного участков с постоянной кривизной приводит к возникновению меридионального напряжения на величину, определяемую выражением (4). Величина этого напряжения зависит от относительной величины радиуса $r_{\text{ср}}/d$.

Перемещение провода по криволинейной кромке наматывающего валика сопровождается силами трения на этой поверхности. Величина силы трения может быть учтена как это принято при учете трения скольжении ремня по шкиву: множителем $e^{\mu\varphi}$, учитывающим угол и коэффициент трения. Поэтому с учетом трения напряжение в проводнике у выхода с границы тороидальной части на прямолинейную равно

$$\sigma_{\text{тр}} = \Delta\sigma e^{\mu\varphi}, \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения;

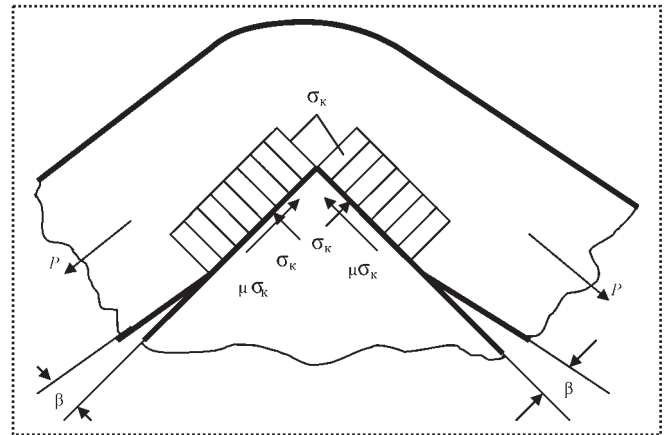


Рис. 4. Эпюры контактных напряжений к определению натяжения в проводнике при накрутке

φ – угол трения, равный $\pi/2$.

Общая величина натяжения в проводнике с учетом увеличения напряжения при спрямлении его у выхода с тороидальной поверхности наматывающего ролика (напряжения между наматывающим валиком и штырем-выводом, на который наматывается проводник) равна

$$\sigma_{\Sigma} = \frac{\sigma_s d}{4r_{\text{ср}}} e^{\mu\varphi} + \frac{\sigma_s d}{4r_{\text{ср}}} = \frac{\sigma_s d}{4r_{\text{ср}}} (e^{\mu\frac{\pi}{2}} + 1). \quad (6)$$

Для определения силовых параметров накрутки провода на вывод рассмотрим проводник с выводом при их пластическом взаимодействии. Наибольшая контактная сила провода с выводом будет в момент, когда ось провода при накрутке и сторона вывода будут на одной линии. Распределение нормальных σ_k и касательных $\mu\sigma_k$ контактных напряжений трения (рис. 4) на контактных поверхностях провода и вывода приблизительно примем равномерным по всей контактной поверхности и равным напряжению σ_s текучести материала провода. Это допущение можно обосновать тем, что степень деформации в наиболее нагруженном месте – на ребре вывода (по опытным данным обычно меньше 10 %). Это приводит только к незначительному упрочнению даже в наиболее нагруженном месте, в других местах оно существенно меньше из-за особенности формы проводника.

Величина осевой силы в проводе здесь равна проекции действующих на контактных поверхностях сил на направление оси провода. Принимаем, что



площадь контакта провода на обеих сторонах ребра вывода одинакова. Тогда сила натяжения провода

$$P = \sigma_s f_k \cos\beta + \mu \sigma_k f_k \sin\beta + \sigma_k f_k \sin\beta + \mu \sigma_k f_k \cos\beta = \sigma_s f_k (1 + \mu)(\sin\beta + \cos\beta), \quad (7)$$

где β – угол наклона оси проводника к стороне вывода;

α_k – нормальное контактное напряжение, равное σ_s ;

f_k – величина площади поверхности контакта проводника с выводом.

Поверхность контакта представляет собой проекцию площади f_c поверхности кругового сегмента на поверхность, расположенную под углом 45° к оси проводника (поперечное сечение вывода – прямоугольник).

Площадь f_c поверхности сегмента определим как разность поверхностей сектора $\pi\alpha/180$ и треугольника с одной из вершин в центре провода и углом при ней, равным α . Тогда площадь сегмента

$$f_c = 2 \left[\left(\frac{d}{2} \right)^2 \frac{\pi\alpha}{180} - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \sin\alpha \cos\alpha \right] = \left(\frac{d}{2} \right)^2 \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right), \quad (8)$$

где α – центральный угол контакта вывода с проводом, град.

Поверхность контакта правой (или левой) части ребра вывода с проводом f_k с учетом наклона контактной поверхности под углом 45° равна

$$f_k = f_c / \cos 45 = 2f_c / \sqrt{2} = \sqrt{2} \left(\frac{d}{2} \right)^2 \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right), \quad (9)$$

а общая величина поверхности контакта, т.е. правой и левой частей у ребра вывода с проводом:

$$f = 2f_k 2\sqrt{2} \left(\frac{d}{2} \right)^2 \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right). \quad (10)$$

С учетом выражений (7) и (9) величина осевой силы в проводнике при накрутке равна

$$P = 2\sqrt{2}\sigma_s \left(\frac{d}{2} \right)^2 (1 + \mu) \times (\sin\beta + \cos\beta) \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right). \quad (11)$$

В этом выражении из-за незначительной величины угла β числовое значение $\sin\beta$ принимают равным нулю, а $\cos\beta \approx 1$. Тогда осевое напряжение в проводнике при его накрутке на вывод равно

$$\sigma_b = \frac{4P}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 2\sqrt{2}\sigma_s \left(\frac{d}{2} \right)^2}{\pi d^2} (1 + \mu) \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right) = \frac{2\sqrt{2}\sigma_s}{\pi} (1 + \mu) \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right). \quad (12)$$

В этом выражении неизвестен угол α . Для его определения используют условие равенства напряжения натяжения, возникающего между натяжным валиком σ_Σ (6) и штырем-выводом σ_b (12) непосредственно при накрутке провода на вывод. После простых преобразований получаем

$$\frac{d}{4r} (e^{\mu \frac{\pi}{2}} + 1) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} (1 + \mu) \left(\frac{\pi\alpha}{90} - \sin 2\alpha \right). \quad (13)$$

В этом уравнении известен коэффициент трения провода по тороидальной поверхности наматывающего валика. Для наших условий сухого трения **принимаем** $\mu = 0,15$, угол контакта провода с тороидальной поверхностью наматывающего валика $\pi/2$, диаметр провода d ; **неизвестны:** радиус r тороидальной поверхности наматывающего валика, угол α . Получаем уравнение (13).

Для разрешения его неопределенности используем физический смысл величины относительного радиуса тороидальной кромки валика и величины напряжения натяжения, которая не должна превышать предел текучести материала провода более чем на 10 % от значения σ_s . Тогда величина соотношения r/d должна быть ориентировочно в пределах 3...5. Принятие такой величины радиуса накрутки не противоречит известным величинам радиусов намотки при выполнении намоточных работ.

В явном виде неизвестную величину угла α выразить невозможно. Поэтому решаем уравнение численным способом и определяем угол α при заданных параметрах процесса. С этой целью преобразуем полученное выражение и представим его в виде уравнений для различных величин r/d :

$$F(\alpha) = 0,0174\alpha - \sin(2\alpha) - 0,2421 \quad \text{при } r/d = 2;$$

$$F(\alpha) = 0,0174\alpha - \sin(2\alpha) - 0,1383 \quad \text{при } r/d = 3,5;$$

$$F(\alpha) = 0,0174\alpha - \sin(2\alpha) - 0,0968 \quad \text{при } r/d = 5.$$

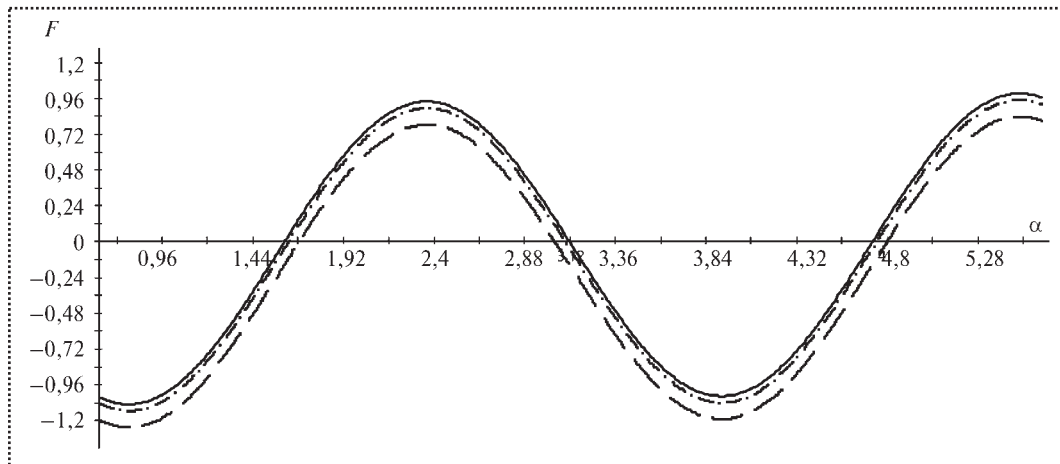


Рис. 5. График зависимости $F(\alpha)$:
 — $r/d = 5$; - - - $r/d = 3,5$; - · - $r/d = 2$

Результат решения показан на рис. 5. Из графика следует, что уравнение имеет множество решений. В соответствии с физическим смыслом можно установить:

- отрицательные значения $F(\alpha)$ можно исключить как решения, не отвечающие физическому смыслу задачи;
- корень уравнения соответствует минимальной величине функции $F(\alpha)$; величины угла для $r/d = 2; 3,5$ и $5 - \alpha = 1,68^\circ; 1,62^\circ$ и $1,59^\circ$; другие значения $F(\alpha)$ дают такую же величину поверхности контакта. Выбор корня должен основываться также на физическом смысле задачи.

Исходя из этого, наиболее подходящим критерием для выбора корня будет величина внедрения ребра вывода в проводник:

$$h = (d/2)(1 - \cos \alpha).$$

На ее основе определим необходимую степень деформации:

$$\psi = 1 - \cos \alpha.$$

Принимаем во внимание, что величина контактного напряжения ориентировочно равна σ_s . Получаем минимальную величину необходимой для герметичного контакта деформацию $\approx 0,002$. С учетом записанного выше выражения для степени деформации ψ угол α должен быть больше или равен соответственно указанным величинам: $\alpha = 1,68^\circ; 1,62^\circ$ и $1,59^\circ$. Принимаем ближайшие к ним меньшие значения корня, обеспечивающие начало пластического деформирования: $4,8^\circ; \sim 4,74^\circ$ и $\sim 4,70^\circ$ для $r/d = 2; 3,5$ и 5 соответственно.

Затем определяем остальные величины: силу накрутки, число витков, работу, мощность.

С учетом определенного из выражения (11) угла α определяем поверхность контакта по выражению (9). Величина внедрения h вывода в проводник

$$h = r_{cp}(1 - \cos \alpha).$$

Число контактных точек проводника с выводом равно

$$n_t = \frac{\pi}{\frac{4}{\sqrt{2}} \left(\frac{\pi \alpha}{180} - 0,5 \sin 2\alpha \right)}. \quad (14)$$

Число витков при накрутке

$$n = n_t / k + n_{из} + n_k, \quad (15)$$

где n_k – число крайних витков с неудовлетворительной проводимостью из-за ненадежного контакта, принимаемое равным 1;

$n_{из}$ – число изолированных витков, принимаемое равным 2;

k – число контактных ребер вывода (для квадратных и прямоугольных выводов, равное 4, V-образных и треугольных – 3, U-образных – 2,5).

Наружный диаметр втулки наматывающего валика равен

$$D \leq 2t \geq \sqrt{a^2 b^2} + 2 \left(\frac{d}{2} + r + c + 0,2 \right), \quad (16)$$

где c – толщина стенки втулки;

0,2 величины диаметра втулки – величина перемычки между каналом провода и наружным диаметром наматывающего валика;

t – шаг установки выводов.



Мощность электродвигателя при накрутке равна, кВт:

$$N = \frac{Pv}{60 \cdot 75 \cdot 1,36}, \quad (17)$$

где v – скорость накрутки провода: $v = 2\pi Rn_n/100$;

$$R = 0,5\sqrt{a^2 + b^2} + 1,5d + r < t;$$

n_n – частота вращения наматывающего валика, обычно 14...300 об/мин.

Проверка решения может быть выполнена по опубликованному в технической литературе данным. Известно, что для обеспечения оптимальной проводимости при накрутке необходимо уложить 3–8 витков модифицированного соединения, из которых 1–2 витка изолированных и еще один виток, учитывающий ненадежность контакта двух первых и двух последних точек, т.е. расчетное число витков должно быть увеличено на 3.

Для проверки полученных зависимостей определим число витков, необходимое для накрутки провода при $r/d = 2; 3,5; 5$; при расчете соответственно принятому соотношению r/d получаем следующие числа контактных точек проводника:

$n_t = 8,6; 15,1; 21,58$. Округляем эти величины до целого числа: 9; 15 и 22. При прямоугольном выводе получаем числа витков $n \cong n_t/4 + 3 = 6, 7, 9$. Эти значения не противоречат фактическим данным и стандартным значениям.

Выводы

Представленные результаты исследования позволяют получить все необходимые для выполнения процесса накрутки и расчета инструмента, накручивающего валика, данные: силовые (сила натяжения, мощность двигателя) и геометрические (радиус тороидальной поверхности накручивающего валика, число точек контакта, число витков катушки, поверхность контакта провода с выводом).

Библиографический список

1. Медведев А.М. Непарные методы неразъемных соединений: накрутка // Технологии в электронной промышленности. 2006. № 3.
2. Технология ЭВА, оборудование и автоматизация / В.Г. Алексеев, В.Н. Гриднев, Ю.И. Нестеров и др. М.: Высшая школа, 1984. 392 с.

А.Б. Барабанов (МГТУ "Станкин", г. Москва)

Обоснование наилучшего варианта сборки комплектов инструмента для станков с ЧПУ

Приведено расчетное обоснование наилучшего варианта системы базирования и закрепления для сборки комплектов режущего и вспомогательного инструментов для станков с ЧПУ.

Design justification is given for the best variant of location and clamping system to assemble cutting and backup tool sets for NC machines.

Ключевые слова: сборка, инструмент, комплект, станок.

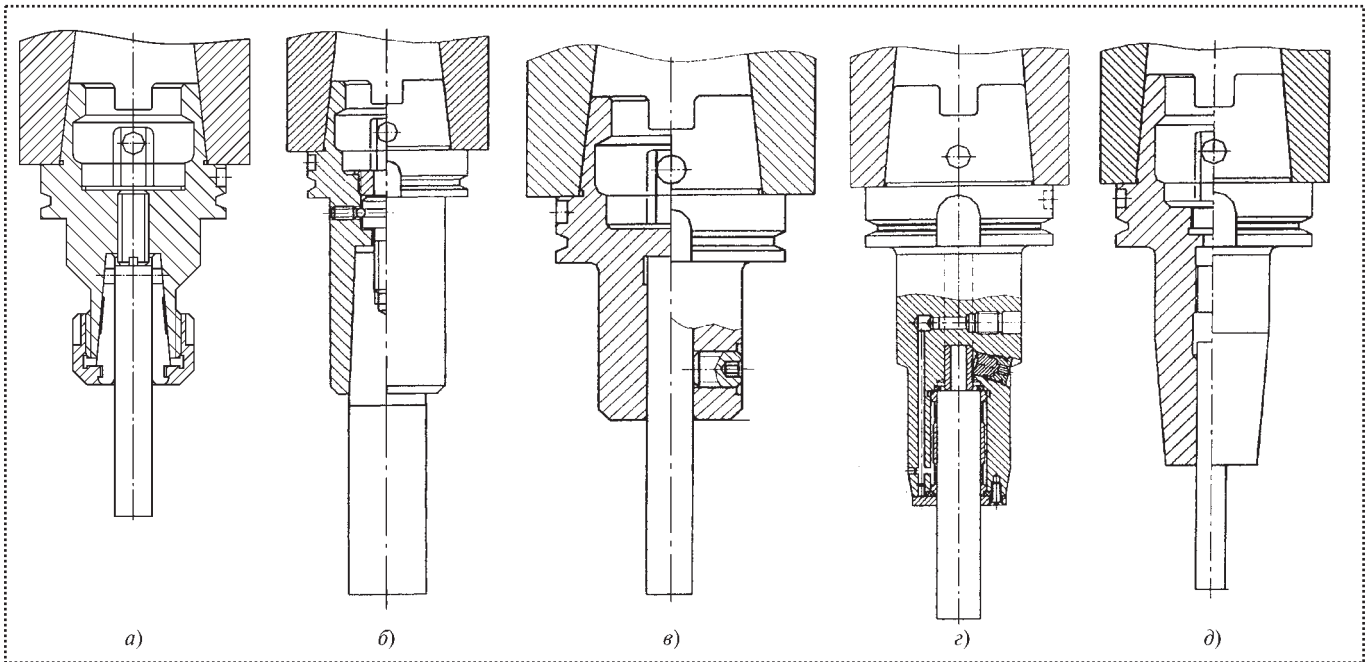
Key words: assembly, tool, set, machine.

Условием автоматизации замены режущих инструментов (РИ) на станках с ЧПУ является унифика-

ция присоединительных поверхностей (хвостовиков) для всех заменяемых РИ разнообразных типов и размеров. В целях унификации стандартные РИ устанавливают в специальных переходных устройствах (называемых вспомогательным инструментом), образуя **комплекты инструмента** для выполнения конкретных технологических переходов. Актуальным является обоснованный выбор систем базирования и закрепления (СБЗ) в таких комплектах с требуемой точностью.

Для сравнения выбраны наиболее применяемые СБЗ (см. рисунок). Их оценка проведена по следующим десяти параметрам.

1. Время обслуживания в системе инструментального обеспечения станка с ЧПУ комплектами


Система базирования и закрепления режущих инструментов:

a – цанговый патрон; *б* – Конус Морзе; *в* – патрон с боковым прижимом винтом; *г* – гидравлический патрон; *д* – термпатрон

инструмента, которое определяют трудоемкостью их сборки из вспомогательного и режущего инструментов.

2. Момент силы сборки.
3. Габариты, определяющие емкость накопителя сменных комплектов (магазина) станка с ЧПУ.
4. Диапазон размеров детали, обрабатываемых одним комплектом инструмента без перехода на другой вспомогательный инструмент (определяют введением в комплект промежуточного сменного элемента, позволяющего переходить от одного поддиапазона к другому).
5. Использование возможностей станка (отношение максимально допустимого вылета комплекта к максимальному, определяемому характеристикой станка, %).
6. Величина, обратная себестоимости изготовления элементов, входящих в комплект, 1/руб.
7. Дисбаланс: величина дисбаланса становится важной при частотах вращения инструмента более 6000 мин⁻¹.
8. Биение закрепленных контрольных оправок (соответствующих типу и типоразмеру закрепляемого РИ), которое характеризует точность сборки комплекта инструмента, мм.

Величину биения $2e_{\Sigma}$, мм, рассчитывали по формуле [1]

$$2e_{\Sigma} = \frac{2}{K_{\Sigma}} \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2 K_i^2 e_i^2},$$

где K_{Σ} – коэффициент относительного рассеивания замыкающего звена размерной цепи:

$$K_{\Sigma} = 1 + \frac{0,55}{\sum_{i=1}^n e_i} \left[\sqrt{\sum_{i=1}^n K_i^2 e_i^2} - \sqrt{\sum_{i=1}^n e_i^2} \right];$$

A_{Σ} – соотношение длины измерения к стандартной длине;

K_i – коэффициент относительного рассеивания i -го сменного элемента;

e_i – биение i -го сменного элемента.

9. Податливость (величина, обратная жесткости) комплекта, м/Н. Значение податливости рассчитано по формуле [1]

$$\delta = \frac{\left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^3}{3EJ_i} + \theta_i \left(\sum_{i=1}^n l_i \right)^2,$$

где l_i – длина вылета, мм;

E – модуль продольной упругости, ГПа;



Сравнительная оценка СБЗ

№ п/п	Оцениваемый показатель	Цанговый патрон	Конус Морзе	Боковой прижим винтом	Гидравлический патрон	Термопатрон
1	Время обслуживания (среднее) в системе инструментального обеспечения участка комплектами инструмента, мин/компоновка	8	12	8	8	8
		1	0,67	1	1	1
2	Момент силы сборки-разборки (средний) на участке подготовки инструмента к работе и его хранения, кН·м	0,8	1,1	0,4	0,4	0,1
		0,5	0,36	1	1	4
3	Расстояние между соседними инструментами в ячейках, определяющее емкость инструментальных магазинов, мм	98	80	80	85	50
		1,23	1	1	1,06	0,63
4	Диапазон размеров, обрабатываемых комплектом сменных наладок без перехода на другой базисный агрегат, мм	50	14	14	14	14
		3,57	1	1	1	1
5	Использование возможностей станка (отношение максимально допустимого вылета комплекта к максимальному, определяемому характеристикой станка), %	91	84	100	91	100
		0,91	0,84	1	0,91	1
6	Величина, обратная себестоимости изготовления элементов, входящих в компоновку без режущего инструмента, компоновка/руб. (Нижнее значение – для себестоимости.)	1/356	1/150	1/175	1/450	1/100
		0,49	1,17	1	0,39	1,75
7	Дисбаланс, г·мм	2,5	2,0	8	2,0	1,5
		3,2	4	1	4	5,33
8	Биение оправок, закрепленных соответственно типу базирования, мм	0,0215	0,0245	0,018	0,005	0,003
		0,84	0,74	1	3,6	6,0
9	Расчетное значение податливости, м/Н	84	278	112	84	40
		1,33	0,4	1	1,33	2,8
10	Стоимость оборудования для сборки комплекта инструментов, тыс. руб.	20	10	5	40	60
		0,25	0,5	1	0,13	0,08

J_i – осевой момент инерции сечения i -го сменного элемента, мм⁴;

θ_i – коэффициент податливости i -й части (кН·м)⁻¹ [1].

10. Стоимость оборудования для сборки комплекта инструментов.

Все данные сведены в таблицу. Верхнее значение – величина показателя в натуральных единицах, нижнее значение – в относительных.

Анализ таблицы показывает, что разработка конструкции системы закрепления, основанной на использовании нагрева токами высокой частоты

(термопатрон), позволит достигнуть кардинального повышения точности сборки комплектов с одновременным снижением величины дисбаланса и уменьшением габаритных размеров комплектов, что увеличит технологические возможности обработки на станках с ЧПУ.

Библиографический список

1. Маслов А.Р. Инструментальные системы машиностроительных производств: учебник. М.: Машиностроение, 2006. 336 с.: ил.

М.Г. Кристаль, канд. техн. наук, О.С. Харькин, канд. техн. наук,
А.В. Дроботов (Волгоградский ГТУ)

Оценка производительности струйного разделения потоков деталей

Предложено рациональное расположение сортировочных отсеков в струйных устройствах сортировки. Выполнены расчеты производительности и статистическое моделирование сортировки при различном расположении сортировочных отсеков. Полученные результаты предложено использовать в задачах комплектования и кассетирования.

The rational arrangement of sorting compartments in jet devices of sorting is offered. Calculations of productivity and statistical simulation of sorting are executed at a various arrangement of sorting compartments. The received results it is offered to use in problems of acquisition and cassette filling.

Ключевые слова: автоматическая сборка, сортировочное устройство, статистическое моделирование.

Key words: automatic assembly, sorting, statistical modeling.

Одним из условий получения качественных изделий при автоматической сборке является доставка на рабочие позиции деталей, соответствующих заданным в технической документации характеристикам. Однако в силу нарушений технологического процесса изготовления деталей или при использовании для сборки метода групповой взаимозаменяемости требуется сортировка деталей по группам в зависимости от значения некоторого параметра ξ сортировки.

Для сортировки используют сортировочные устройства различной конструкции. Среди них наибольшим быстродействием и высокой надежностью обладают струйные сортировочные устройства (ССУ). Принцип работы ССУ [1] таков, что перемещение деталей в соответствующий сортировочный отсек под действием разнонаправленных струй сжатого воздуха осуществляется после выполнения измерения в контрольном устройстве параметра ξ , по которому проводят сортировку (рис. 1).

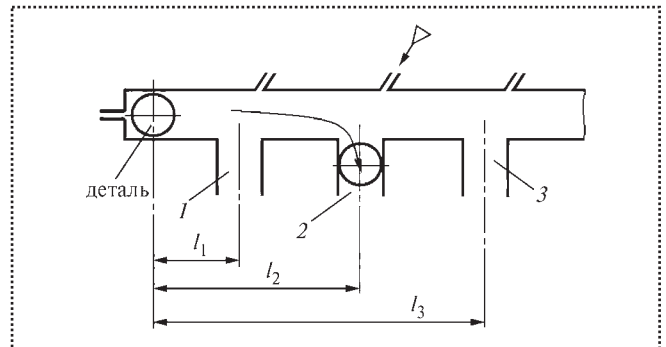


Рис. 1. Схема струйного сортировочного устройства: $i = 1, 2, 3$ – номера сортировочных отсеков; l_1, l_2, l_3 – расстояния от начального положения детали в транспортном канале до 1, 2 и 3 сортировочных отсеков соответственно

Поскольку параметр ξ является величиной случайной с кривой распределения $f(\xi)$, то для повышения производительности Π сортировки следует располагать сортировочные отсеки таким образом, чтобы детали с более часто встречаемым значением параметра ξ располагались ближе к начальному положению детали в транспортном канале (см. рис. 1).

В работе [1] приведена модель динамики перемещения детали в струйном сортировочном устройстве, позволяющая определить время t_i достижения деталью i -го сортировочного отсека в зависимости от расстояния l_i . Обычно расстояния $(l_i - l_{i-1})$ между сортировочными отсеками выбирают равным постоянной величине A . Тогда, в общем виде $l_i = iA$. Однако при предлагаемом расположении сортировочных отсеков их нумерация будет изменена на значение j .

На рис. 2 представлены варианты базового и предлагаемого расположений сортировочных отсеков при четном и нечетном количестве n групп сортировки для симметричного нецентрированного распределения случайной величины ξ с математическим ожиданием E_ξ , стандартным отклонением σ_ξ и плотностью вероятности $f(\xi)$. Номера перемещенных j и исходных i групп сортировки будут находиться в следующей зависимости:

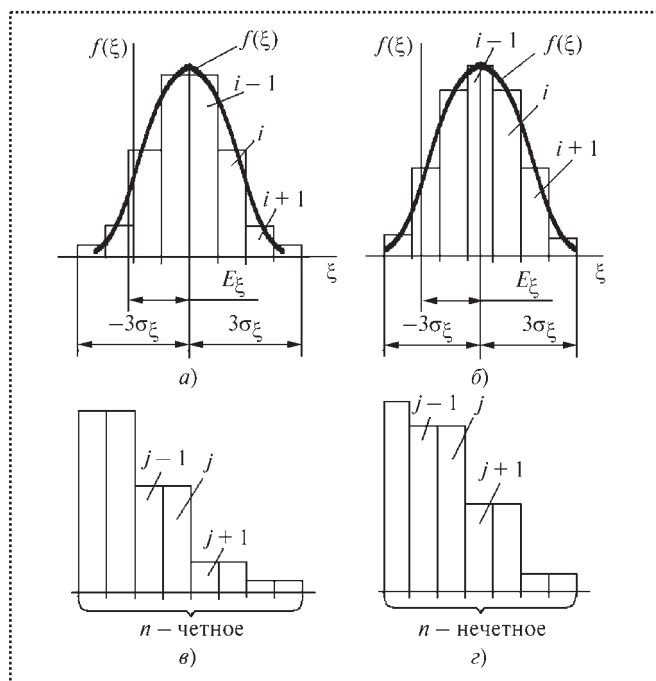


Рис. 2. Расположение сортировочных окон:

a, б – кривые распределения значений сортировочного параметра при четном и нечетном количестве n групп сортировки для базового расположения сортировочных окон соответственно; *в, г* – рациональное расположение сортировочных окон при четном и нечетном количестве n групп сортировки соответственно

♦ для четных значений числа n сортировочных групп

$$i = \begin{cases} \frac{n-j+2}{2}, & \text{для четных } j; \\ \frac{n+j+1}{2}, & \text{для нечетных } j, \end{cases} \quad (1)$$

♦ для нечетных значений числа n сортировочных групп

$$i = \begin{cases} \frac{n-j+2}{2}, & \text{для нечетных } j; \\ \frac{n+j+1}{2}, & \text{для четных } j. \end{cases} \quad (2)$$

Тогда при известном объеме m партии сортируемых деталей можно определить их количество z_i , попадающих в i -ю сортировочную группу согласно выражению

$$z_i = m \int_a^b f(\xi) d\xi,$$

где $a = E_\xi - 3\sigma_\xi + 6\sigma_\xi(i-1)/n$;

$b = E_\xi - 3\sigma_\xi + 6\sigma_\xi i/n$.

Для базового расположения сортировочных окон (см. рис. 2, *a, б*) суммарное время T_i поступления z_i деталей можно вычислить как $T_i = z_i t_i$. Тогда общее время T_Σ сортировки партии из m деталей по n группам составит

$$T_\Sigma = \sum_{i=1}^n T_i,$$

а средняя производительность Π_{cp} сортировки может быть определена как

$$\Pi_{cp} = \frac{m}{T_\Sigma}. \quad (3)$$

Аналогично для предлагаемого расположения сортировочных окон (см. рис. 2, *в, г*) при известной величине времени t_j поступления одной детали в соответствующее сортировочное окно j в зависимости от расстояния l_j с учетом выражений (1) и (2) можно определить суммарное время T_j поступления z_i детали в j сортировочное окно:

$$T_j = z_i t_j.$$

Общее время T_Σ^* сортировки партии из m деталей по n группам при рациональном расположении сортировочных отсеков составит

$$T_\Sigma^* = \sum_{j=1}^n T_j,$$

а средняя производительность Π_{cp}^* сортировки может быть определена как

$$\Pi_{cp}^* = \frac{m}{T_\Sigma^*}.$$

Тогда коэффициент $\varphi_n = \Pi_{cp}^*/\Pi_{cp}$ увеличения производительности можно определить по выражению

$$\begin{aligned} \varphi_n &= \left(m \sum_{i=1}^n z_i t_i \right) / \left(m \sum_{i=1}^n z_i t_j \right) = \\ &= \left(\sum_{i=1}^n z_i t_i \right) / \left(\sum_{i=1}^n z_i t_j \right). \end{aligned} \quad (4)$$

Абсолютное значение производительности струйной сортировки деталей в зависимости от числа n групп сортировки варьируется в пределах 210...500 дет./мин.

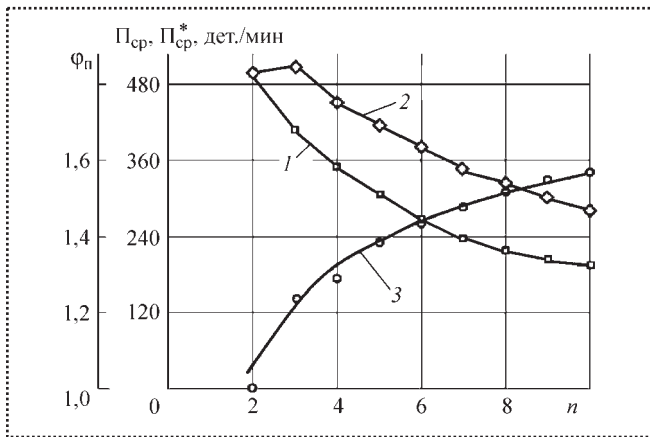


Рис. 3. Влияние количества n групп сортировки на коэффициент φ_n :
 1 – Π_{cp} ; 2 – Π_{cp}^* ; 3 – φ_n

Из выражения (4) следует, что коэффициент φ_n увеличения производительности сортировки не зависит от объема m партии сортируемых деталей. Расчет показал, что производительность устройства в соответствии с предлагаемым расположением сортировочных окон повышается в 1,4–1,6 раза. Установлено, что этот эффект усиливается с возрастанием числа n групп сортировки (рис. 3).

Для различного объема m партии сортируемых деталей в качестве проверки полученных результатов выполнено компьютерное моделирование методом статистических испытаний, алгоритм которого представлен на рис. 4.

Здесь в блоках 1, 14 задаются начальные значения для расчета в цикле, образованном блоками 2, 3, 4. В самом цикле выполняется расчет и наполнение массива $P^3[i]$ полной вероятности значений контролируемого параметра ξ до верхней границы i -го группового допуска w . Затем циклом по переменной $j \in [1, m]$ в блоках 5...13 вычисляется экспериментальное значение и создается массив $z^3[i]$ количества деталей, попавших в i -ю группу. Для этого в блоке 7 генератором случайных чисел формируется величина RV , имеющая равномерное распределение в пределах $[0; 1,0]$, которая сравнивается в цикле блоком 10 с элементами массива значений полной вероятности $P^3[i]$. Это позволяет накапливать в блоке 12 массив $z^3[i]$ экспериментальных значений числа деталей, попавших в i -ю сортировочную группу.

В цикле, образованном блоками 15, 16, 17 по массиву данных времени $T[i]$ достижения деталью соответствующего сортировочного отсека и по ко-

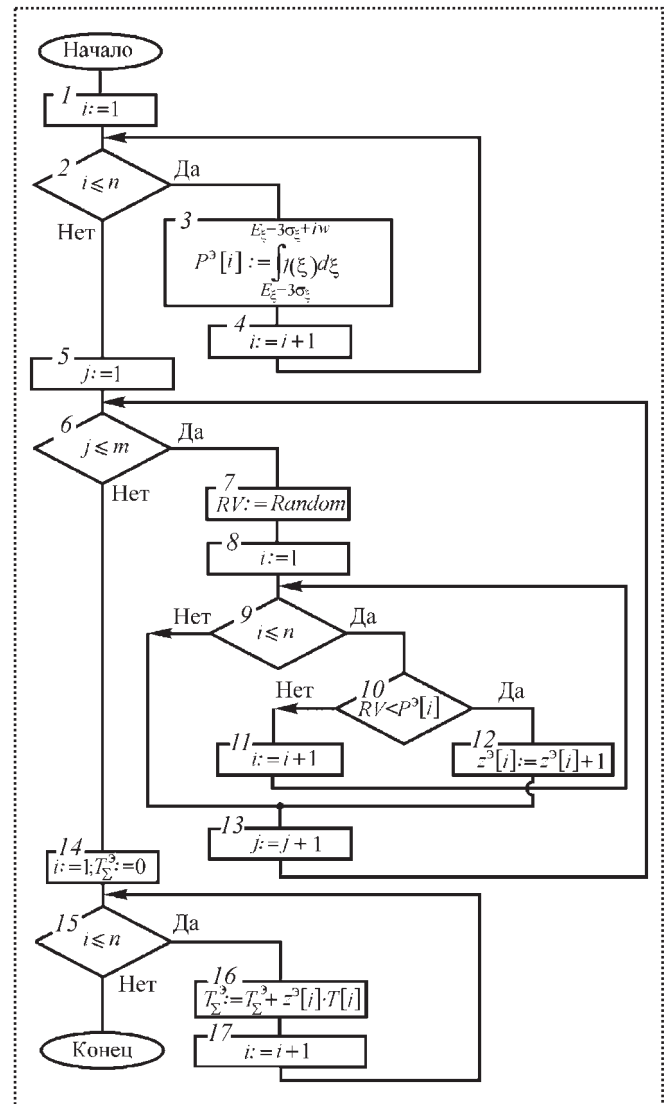


Рис. 4. Алгоритм моделирования статистического процесса сортировки

личеству $z^3[i]$ этих деталей, определяется суммарное время T_Σ^3 сортировки партии из m деталей (блок 16). При статистическом моделировании сортировки в соответствии с предлагаемой схемой расположения сортировочных окон в алгоритм согласно выражениям (1) и (2) вводится вместо массива значений $T[i]$ массив $T[j]$.

На рис. 5 представлены результаты распределения расчетного суммарного времени по группам для многодиапазонной сортировки ($n = 10$).

Полученные данные показали, что расхождение теоретических и экспериментальных данных по производительности струйных сортировочных устройств не превышает 2 % для партии деталей

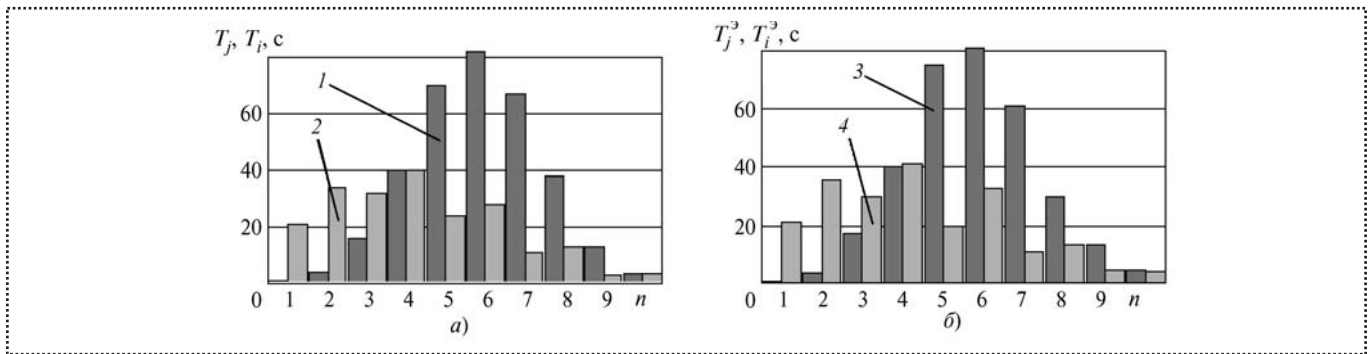


Рис. 5. Распределение времени сортировки групп деталей с базовым и рациональным расположением сортировочных отсеков: а – теоретическое; б – полученное в результате моделирования; 1 – T_i ; 2 – T_j ; 3 – T_i^3 ; 4 – T_j^3

$m = 1000$ шт, что свидетельствует о перспективности использования ССУ с рациональным расположением сортировочных отсеков.

Предлагаемые ССУ в соответствии с динамикой движения деталей, описанной в [1], также могут быть использованы:

- для разделения потока деталей, выходящего из высокопроизводительного бункерного загрузочного устройства;
- для снабжения нескольких рабочих позиций одноименными деталями;

- для укладки деталей в кассеты;
- для комплектования [2] собираемого узла разноименными деталями из кассет.

Библиографический список

1. Харьков О.С., Дроботов А.В., Стегачев Е.В., Кристалль М.Г. Динамика перемещения деталей в струйных сортировочных устройствах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2007. № 1. С. 17–19.
2. А.с. № 927650 (СССР) Устройство для поштучной выдачи изделий с заданным адресом / М.Г. Кристалль, Л.А. Рабинович, Г.П. Барабанов, В.А. Ярмак, А.И. Малолетков, В.Д. Мельниченко. БИ № 18, 1982.

ЗАО "ОРЛЭКС" приглашает

организацию для выполнения работ по проектированию и изготовлению робототехнического комплекса (РТК), включающего робототехнические линии по изготовлению сборочных единиц (узлов), сборке, регулировке, испытанию датчиков реле температуры для домашних холодильников с последующим проведением пусконаладочных работ и сопровождением (поставкой запчастей) РТК.

Для проведения работ предоставляются чертежи, ТУ, инструкции по сборке, регулировке, проведению приемосдаточных испытаний, действующих техпроцессов сборки, регулировки и испытаний датчиков реле температуры.

Годовая программа выпуска датчиков реле температуры около 5 млн шт. Технико-экономическое обоснование РТК – в процессе совместной разработки технического задания.

302000, г. Орел, ул. Ломоносова, д. 6

Тел. (4862)41-86-67, 8-960-647-35-91

Юрий Владимирович Селезнев

В.С. Чебанов, Б.П. Башуров (ФГОУ ВПО "Морская государственная академия им. адмирала Ф.Ф. Ушакова, г. Новороссийск)

Методы диагностирования, оценка технического состояния оборудования систем судовых дизелей при эксплуатации и средства мониторинга отказов*

Приведена структура комплекса судовой дизель – обслуживание системы. Рассмотрены методы диагностирования технического состояния. Произведена оценка его состояния применительно к элементам топливной системы, воздушной и системы охлаждения на основе динамики потока отказов, вероятности безотказной работы и предельных норм диагностических параметров. Дана классификация средств мониторинга отказов в зависимости от уровней, конкретных групп и признаков.

The structure of the ship diesel – servicing systems have been presented. The methods of technical condition diagnostics have been considered. The estimation connected with reference to air system, fuel system and cooling system based on the flow failure, workability and limited rates of diagnostics parameter has been made. The classification of the monitoring facilities failure based on the dependencies on levels, groups and signs has been given.

Ключевые слова: судовой дизель, техническое состояние, поток отказов.

Key words: ship diesel, technical condition, flow failure.

Мелкосерийность производства обслуживающих систем (ОС) судовых дизелей (СД) при решении задач, связанных с оценкой показателей функциональной надежности (ФН), предопределяет появление проблемы достаточной достоверности. В этом случае единственный путь снижения ее остроты – это использование технического диагностирования (ТД) [1].

При решении задач ТД важное значение имеет разработка диагностических моделей (ДМ). Их исследование позволяет сформировать перечень диагностических показателей (ДП), определить мето-

ды их оценки, уровень работоспособности, признаки наличия дефектов, конкретизировать алгоритмы и программу диагностирования [2]. Решение вопросов ТД – основное условие перевода ОС на техническое обслуживание (ТО) по фактическому состоянию. Оно связано с определением наиболее информативных диагностических параметров ОС и ее технического состояния (ТС).

К настоящему моменту методы ТД достаточно хорошо разработаны. Поэтому практическая задача сводится к применению известных методов к диагностированию конкретной ОС. Одним из эффективных признан метод диагностирования ТС по параметрам работающего смазочного масла. Наиболее целесообразным считается комплексное использование аналитических методов оценки качества масел (инфракрасной спектроскопии, атомно-абсорбционной спектрометрии, феррографии).

С методической точки зрения оценку ТС рекомендуют проводить по трем уровням, каждый из которых соответствует степени износа трущихся деталей, определяющий проведение конкретных мероприятий со стороны обслуживающего персонала. Основными факторами, определяющими ФН ОС, являются:

- режимы использования;
- качество профилактических и ремонтных работ;
- количество и качество запасных частей и способов их хранения;
- квалификация обслуживающего персонала;
- степень совершенства технической и нормативной документации;
- эргономические факторы;
- качество надзора со стороны контролирующих органов.

Степень их воздействия неоднозначна. Предпочтение отдают режимам использования, однако не меньшее значение имеет текущий контроль ТС как отдельных элементов, так и ОС в целом.

*По материалам 10-й Международной научно-практической конференции. С.-Петербург. 15–18 апреля. 2008 г.



Из существующих видов контроля на настоящий момент для ОС наиболее приемлемы *диагностический* и *прогнозируемый*. Оба вида контроля необходимо рассматривать как единое целое, исходя из того, что прогнозируемый контроль является продолжением диагностического, но на более высокой степени развития. В совокупности они позволяют выявить неисправности ОС на ранней стадии возникновения и своевременно их устранить.

Процесс диагностирования ТС осуществляют с использованием двух групп способов [1, 2]: **традиционные** (неразрушающие) и основанные на **новых физических принципах** (акустическая эмиссия, метод резонансных колебаний). При оценке ТС с учетом предыстории изменения параметров в зависимости от конкретных ситуаций могут быть использованы аналитические и вероятностные методы прогнозирования.

Показатель, характеризующий качество работы ОС, определяют шириной полей допусков диагностических параметров x и численными значениями выходных характеристик (статические, динамические). Применительно к конкретной ОС (в зависимости от значения x) различают области *функционирования*, *работоспособности* и *упреждающих допусков* (УД).

Область *функционирования* ОС ограничена нижним $x_n^{кр}$ и верхним $x_v^{кр}$ критическими значениями. При ее технической эксплуатации (ТЭ) за пределами этой области функция качества $A(x)$ может снизиться настолько, что изделие не сможет отвечать функциональному назначению.

В области *работоспособных состояний* ОС параметр x должен находиться в допустимых пределах, ограниченных значениями $x_n^д$ и $x_v^д$, при этом диапазон приемлемых значений параметра $x_v - x_n = B_x$ принято называть полем допуска параметра x .

Наличие УД позволяет создать запас работоспособности ОС и обеспечить при периодическом контроле с профилактическими (восстановительными) работами ее безотказную работу до очередной проверки, а при непрерывном контроле – до возможности выполнения восстановительных работ. Установление значения УД – одна из основных задач прогнозирования состояния ОС.

Исходным условием определения значения УД x_y на параметр x является заданная вероятность его выхода за границу рабочего допуска (заданная допустимая вероятность неполного отказа). В зависи-

мости от числа регламентируемых границ полей допусков параметра различают двусторонние (с двумя границами) и односторонние (с одной границей) поля. Двусторонние поля могут быть симметричными и несимметричными относительно номинального значения параметра.

На этапах жизненного цикла ОС (изготовление, ТЭ, ремонт) на нее воздействуют различные факторы и предъявляются соответствующие требования, а поэтому для каждого из них должны устанавливаться и различные допуски на диагностические параметры (производственные $B_{пр}$, эксплуатационные $B_э$, ремонтные $B_{рем}$). При этом должно соблюдаться следующее соотношение: $B_{пр} \leq B_{рем} \leq B_э$. В процессе эксплуатации ОС с точки зрения ее безотказной работы возможны различные значения определяющего диагностического параметра:

- ♦ $x > x^{кр}$ (свидетельствует об отказе ОС);
- ♦ параметр находится в зоне УД $x_y < x < x^{кр}$ (требуется проведение профилактических мероприятий, текущий ремонт, замена);
- ♦ после выполнения этих мероприятий значение контролируемого параметра возвращается в область $x < x_y$.

Однако в процессе дальнейшей ТЭ ОС может оказаться в зонах УД и отказовых зонах ТС (с вероятностью Q и q) соответственно.

С точки зрения системного подхода, комплекс СД – ОС представляют в виде схемы (рис. 1).

Каждая из систем играет определенную роль в обеспечении эксплуатационных качеств СД и, в частности, ФН. Формирование единого алгоритма управления комплексом является многофакторной задачей, осложняющейся различием ТС даже однотипных СД и ОС. В целях получения такой информации проведены статистические исследования ФН, результаты которых для части ОС приведены ниже.

Динамика потока отказов топливных насосов высокого давления (ТНВД) СД представлена на рис. 2. Наибольшая интенсивность отказов приходится на зону в пределах наработки $t = (0...7) \cdot 10^3$ ч.

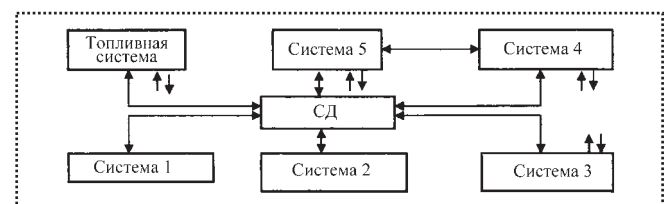


Рис. 1. Структурная схема комплекса СД – ОС

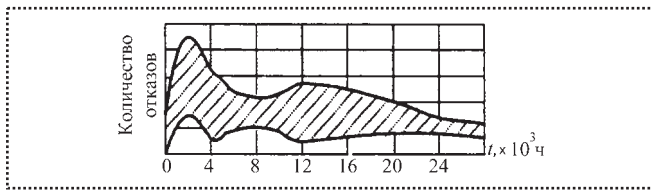


Рис. 2. Динамика потока отказов топливных насосов высокого давления судовых дизелей различных типов

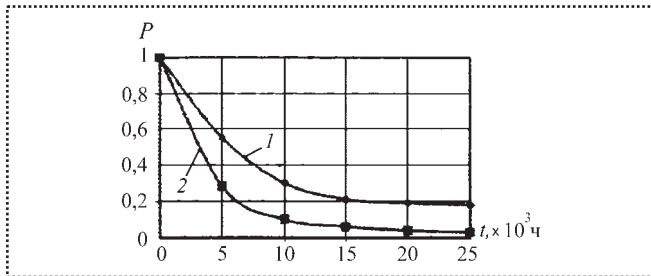


Рис. 3. Вероятности безотказной работы центробежных насосов системы охлаждения СД:

1 – первый контур охлаждения; 2 – второй контур охлаждения

Это обусловлено приработкой основных узлов ТНВД, которая сопровождается повышенным износом соприкасающихся поверхностей. Возможны и другие причины, например, фактор скрытого дефекта материала, приводящий к излому, характер которого в зависимости от условий ТЭ может быть разнообразным (абразивный, адгезивный в виде молекулярного схватывания, регулярных волн, тепловой, усталостный).

Другим элементом топливной аппаратуры СД являются форсунки, ТС которых существенным образом оказывает влияние на эффективность ТЭ СД. Ухудшение ТС форсунок в процессе ТЭ приводит к значительному увеличению расхода топлива на СД, особенно при работе в диапазоне малых нагрузок.

Важное значение с точки зрения теплонапряженности СД отводится системам охлаждения, в конструктивном отношении состоящим из двух контуров. В первом контуре циркулирует пресная вода, а во втором – морская. Поэтому оборудование этих систем (в частности, насосы) работают в различных условиях, что и обуславливает различие их ТС (рис. 3).

Эффективность ТЭ СД наряду с оборудованием топливной системы и системы охлаждения во многом определяется уровнем ФН оборудования воздушной системы, основным из которого являются

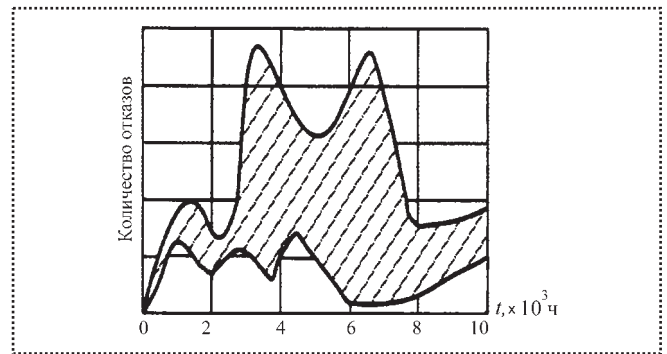


Рис. 4. Динамика потока отказов поршневых компрессоров высокого давления воздушной системы СД

компрессоры. Их динамика потока отказов в зависимости от наработки приведена на рис. 4.

Спектр возможных ТС разделяется на ряд областей (категорий), основанных на использовании норм (допустимых значений диагностических параметров), соответствующих конкретной категории состояния. Каждая область ТС отделяется одна от другой разделяющим слоем, толщина которого должна быть в пределах точности определения параметра. В связи с тем, что при нормировании ТС разделяющий слой задается линией, то ее целесообразно проводить по его верхней границе. Исходя из этого задача ТД (в общем виде) дифференцируется в зависимости от наиболее существенных свойств ОС, обеспечивающих ее устойчивое функционирование, и закономерностей изменений этих свойств. В конечном итоге решение всех отдельно взятых задач связано с определением возможных видов ТС, в которых может находиться ОС в процессе ТЭ.

Допустимые нормы диагностических параметров для оценки ТС насосов системы охлаждения и воздухоохладителей воздушной системы СД представлены в табл. 1 и 2.

Одним из основных способов повышения эффективности ТЭ СД является предупреждение возникновения отказов и неисправностей обслуживаемых систем на ранней стадии. Решение такой задачи осуществляется с помощью средств мониторинга отказов (СМО). Их использование в эксплуатационной практике дает возможность снизить материальные затраты на ТО примерно на 25 %, а удельный расход топлива на 1,5 %. Основная цель СМО, включающих методики, программы, устройства и приспособления, состоит в определении степени вероятности отказа ОС, ее



узлов и деталей, а также нахождении и устранении причин возникновения отказа на начальной стадии. Они классифицируются по двум **уровням** и представляются конкретной **группой признаков**. *Первый уровень* основывается на *признаках*, характеризующих функциональные особенности и режим работы СМО (предмет и метод ТД, периодичность работы диагностируемого ОС и активность средств). В этом случае СМО разделяют на диагностирующие ход теплотехнических процессов и ТС ОС. Первый уровень подразумевает следующее разделение СМО:

- дефектоскопия;
- тестирование и испытание ОС;
- шумовое ТД с использованием виброакустического контроля;

- ТД с использованием математического моделирования.

Математическое моделирование обладает большими потенциальными возможностями по предупреждению отказов и аварийных ситуаций, возникающих в процессе ТЭ, связанных с работой СД в нерегламентированных режимах.

По периодичности работы СМО разделяются на *активные* (тестирование, дефектоскопия) и *пассивные* (шумовые методы, ТД с использованием математического моделирования, средства непосредственной оценки остаточного ресурса). Первые задают объекту возмущающее воздействие и исследуют реакцию ОС на него, а вторые – анализируют невозмущенные параметры ОС.

Второй уровень включает СМО, образованные по предмету ТД. Их разделение осуществляется по

1. Допустимые значения диагностических параметров центробежных насосов

Характер неисправности насоса	Диагностические параметры				
	Ударные импульсы, дБ (более)	Вибрация, мм/с (более)	Подача, напор, % (менее)	Сила тока, А, % (менее)	Уменьшение толщины корпуса, % (более)
Повреждение подшипника качения	40	–	–	–	–
Повреждение подшипника скольжения	–	6	–	–	–
Эрозия рабочего колеса	–	6	60	–	–
Занос проточной части	–	6	60	20	–
Кавитация	4	6	60	–	–
Изменение внутренних уплотнений	–	–	60	20	–
Разрушение поверхности корпуса	–	–	–	20	–
Ослабление крепления насоса	–	6	–	–	–
Износ сальникового уплотнения	–	–	–	20	–

2. Допустимые нормы диагностических параметров воздухоохладителей

Конструктивные модификации воздухоохладителей	Разность температур ΔT , °С, в зависимости от категории состояния ТС		
	хорошее	удовлетворительное	неудовлетворительное
Кожухотрубный с отдельным корпусом первой и второй ступеней компрессора	$5 < \Delta T < 10$	$10 \leq \Delta T \leq 25$	$\Delta T > 25$
Кожухотрубный с общим корпусом первой и второй ступеней компрессора	$15 < \Delta T < 25$	$25 \leq \Delta T \leq 45$	$\Delta T > 45$
Секционные с отдельным корпусом первой и второй ступеней компрессора	$20 < \Delta T < 35$	$35 \leq \Delta T \leq 55$	$\Delta T > 55$



признакам, конкретизирующим предмет. Если предметом является теплофизический процесс, то СМО разделяются **по физическому характеру** диагностируемого процесса на диагностирующие физический процесс и гидродинамический процесс теплообмена.

С точки зрения **шумового метода** ТД, в зависимости от анализируемого параметра СМО подразделяют на теплофизическое, акустическое, вибрационное. Первое основано на спектрально-корреляционном анализе малых отклонений температуры и расхода теплоносителя от их средних значений, а второе и третье – на анализе пульсаций давления жидких и газообразных сред, имеющих внутренний и наружный контакт с ОС. Причинами пульсаций в процессе ТЭ являются вибрации деталей ОС и флуктуации теплогидравлических процессов в средах.

В области разработки и создании СМО применительно к СД чаще всего ограничиваются частными задачами и меньше внимания уделяют формированию концепции единой системы ТД. В то же время формирование такой концепции и объединение на ее основе одиночных СМО в комплексную диагностическую систему дает возможность существенно повысить эффективность работы СМО.

В таком направлении производятся работы в ЗАО ЦНИМФ, где создана экспертная система ТД (ЭСТД) "Вещун", основанная на сочетании диагностических средств и вычислительной техники (персональной ЭВМ). Она позволяет оперативно оценивать ТС диагностируемого элемента, сокращать время поиска неисправностей и прогнозировать ТС, а также предотвращать аварийные ситуации и сохранять накопленный опыт ТЭ.

Принцип действия ЭСТД основан на отнесении объекта ТД к одной из **категорий** состояния ТС (А, В, С, D), принятых в международной практике. Каждой категории соответствует определенный объем работ по ТО и ремонту. Исходя из того, что ТС диагностируемого элемента описывается множеством ДП, любая из категорий представляется как подмножество ТС. Для оценки уровня принадлежности ДП категории состояния используют характеристическую функцию в интервале $[0, 1]$, называемую функцией μ принадлежности, а для ее градуации используют стандартную условную шкалу.

Каждая категория в пределах изменения величины μ характеризуется своим возрастающим уровнем неисправности элемента, его ТС и необходимостью проведения ТО. При использовании категорий состояния вероятность диагноза по ошибкам "ложная тревога" составляет 0,90...0,93, а по "пропуску дефектов" – 0,94...0,95. Система позволяет осуществлять прогнозирование и анализ тенденций, а также выдавать рекомендации по ТО и указывать причины неисправностей. Такая система по сравнению с зарубежными аналогами имеет меньшую стоимость и лучше приспособлена к отечественным элементам систем, в частности ОС, обслуживающих СД.

Библиографический список

1. Башуров Б.П. Пути совершенствования технической эксплуатации вспомогательного оборудования энергетических установок судовых транспортных средств: Монография. Новороссийск: НГМА, 2002. 269 с.
2. Коллакот Р. Диагностика повреждений. М.: Мир, 1989. 512 с.
3. Моек Е., Штрикерт Х. Техническая диагностика судовых машин и механизмов: пер. с нем. Л.: Судостроение, 1986. 232 с.

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

из ГОСТ Р ИСО 20806–2007 "Балансировка на месте роторов больших и средних размеров"

Режим работы машины при балансировке

В процессе балансировки на месте машина подвергается многократным пускам и остановам, что может быть связано с нагрузками, не характерными для работы машины в нормальных условиях. Возможность работы машины в данном режиме требует проведения специального анализа (пример такого анализа для машин некоторых классов приведен в таблице (см. **Справочный материал**, стр. 36). Необходимо убедиться, что многократные пуски и остановы не приведут к ухудшению надежности и сокращению срока эксплуатации машины.

Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, О.Б. Бердник, Я.А. Фель
(ЗАО НПЦ "Трибоника", Нф ИМАШ РАН, г. Нижний Новгород)

Ремонтно-восстановительная технология с применением плазменных покрытий для лопаток газотурбинных двигателей газоперекачивающих агрегатов*

Исследовано постэксплуатационное состояние рабочих лопаток компрессора и турбины газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата после отработки назначенного ресурса. Разработаны технологии продления ресурса лопаток, включающие механическую, электроимпульсную, восстановительную термическую обработки и нанесение защитных плазменных покрытий.

The postoperation condition of workers blades the compressor and the turbine gas turbine the engine gas-transfer the unit after improvement of the appointed resource is investigated. Technologies of prolongation of a resource blades, including mechanical, electropulse, regenerative thermal processings and drawing of protective plasma coverings are developed.

Ключевые слова: лопатка компрессора, турбина, ресурс.

Key words: blade the compressor, turbine, resource.

Лопатки газотурбинных двигателей (ГТД) являются наиболее ответственными деталями среди всех узлов газоперекачивающих агрегатов. При эксплуатации ГТД происходит процесс старения узлов и деталей, что ограничивает их ресурс. Интенсивность их старения определяют временем фактической наработки, количеством пусков и условиями эксплуатации.

Основными видами повреждений лопаточного аппарата являются усталостное разрушение, эрозионный и коррозионный износ рабочей поверхности. Своевременно и правильно проведенные ремонтно-восстановительные работы позволяют в 2–3 раза снизить суммарную скорость старения и существенно увеличить срок службы лопаток.

*По материалам 10-й Международной научно-практической конференции. С.-Петербург. 15–18 апреля. 2008 г.

Методика исследований

Разработка ремонтно-восстановительных технологий для разных видов лопаточного аппарата проводилась на основе анализа постэксплуатационного состояния материала лопаток ГТД ГТК-25И, ГТК-10И (производства компании "Nuovo Pignone"), отработавших назначенный ресурс, с разной фактической наработкой.

При изучении состояния материала лопаток использованы разнообразные физико-химические методы исследования:

- оптическая металлография (на оптическом микроскопе "Неофот-32);
- рентгеноструктурный анализ (на дифрактометре "Дрон-3М");
- измерение микротвердости (на микротвердомере ПМТ-3);
- определение коэффициента пластичности;
- релаксационные испытания;
- механические испытания на разрыв;
- коррозионные испытания электрохимическим методом (на потенциостате П 5848 по ГОСТ 9.912–89);
- испытания на абразивный износ и предел выносливости (на стенде на базе 10^7 циклов при 50 % вероятности разрушения);
- испытания на длительную прочность.

В процессе длительной эксплуатации компрессорные лопатки подвергаются интенсивному воздействию воздушного потока при повышенных температурах (до 350 °С). Основными видами поверхностного повреждения компрессорных лопаток, изготовленных из нержавеющей стали 12Х13, являются эрозионный и коррозионный износ. В результате эрозионного воздействия среды происходит частичное или полное удаление с их рабочей поверхности защитного покрытия на основе никеля, и в стали интенсифицируются процессы коррозии.



Наличие вредных примесей в промышленной атмосфере и, в первую очередь, хлор-ионов, активизирует протекание питтинговой коррозии. На начальной стадии имеет место точечная коррозия; раковины и питтинги полусферической формы с отложениями оксидов железа, впоследствии при слиянии из них образуются язвины и оспины.

Затем от переменных тепловых напряжений образуются коррозионно-усталостные трещины.

Установлено, что материал лопаток в области коррозионных повреждений имеет более рыхлое строение и, как следствие, обладает пониженной микротвердостью в поверхностном слое толщиной до 6 мкм. Релаксационные испытания показали, что наличие коррозионных дефектов приводит к снижению предела микропластичности (упругости) α_0 на 40 %, а физического предела текучести σ^* материала – на 20% по сравнению с исходным состоянием материала лопатки (нормируемые показатели для стали 12X13: $\sigma_0 = 270$ МПа, $\sigma^* = 490$ МПа). Состояние материала в области коррозионных повреждений характеризуется как разупрочненное.

Методами металлографии и рентгеноструктурного анализа установлено, что после эксплуатации фазовый состав и микроструктура стали 12X13 не изменяются и представляют собой перлитобразный сорбит. После эксплуатации в течение 58...60 тыс. ч обнаружены изменения в тонкой структуре металла, а именно накопление свободных дислокаций в зерне.

В результате перестройки дислокационной структуры происходит укрупнение субзеренных блоков, т.е. формируется субструктура с крупным субзерном и высокой плотностью дислокаций внутри него. Это вызывает увеличение количества микродеформаций на порядок. Такая структура характерна для состояния деформационного упрочнения.

В результате возникающих структурных изменений микротвердость поверхности пера повышается на 35 %. В случае дальнейшей эксплуатации лопаток без ремонта при превышении рабочих напряжений предела текучести в материале будут протекать процессы пластической деформации, заключающиеся в перестройке дислокационных полей в энергетически более выгодные конфигурации. При увеличении наработки до 80 тыс. ч происходит размельчение внутризеренной структуры феррита. В результате протекания процесса пла-

стической деформации происходит релаксация микронапряжений. При дальнейшей эксплуатации лопаток без восстановительного ремонта можно прогнозировать процессы фрагментации ферритного зерна и образование субграниц с высокой плотностью дислокаций (ρ_L), образующих стенки и сетки. Поэтому с точки зрения дислокационной природы усталостной прочности, в работоспособности лопаточного аппарата имеется определенный ресурс. Но в некоторый момент времени стадия деформационного упрочнения резко может смениться стадией разупрочнения.

Результаты релаксационных испытаний подтвердили данные рентгеновских исследований субструктуры. Установлено, что с увеличением времени эксплуатации лопаток растет физический предел текучести σ^* материала в опасном околосамковом сечении. Можно констатировать, что материал большей части лопаток находится в стадии деформационного упрочнения. С увеличением фактической наработки >60 тыс. ч выявлена тенденция снижения предела микропластичности. Это говорит о том, что в микрообъемах материала под действием рабочих нагрузок начинают протекать процессы пластической деформации.

Исследовано влияние разных видов термообработки на микроструктуру и физико-механические свойства лопаточной нержавеющей стали 12X13. Проведена оптимизация режима восстановительной термообработки. Был выбран режим, не изменяющий фазовый состав и микроструктуру материала (700 °С, 2 ч).

Термообработка, проводимая в целях снятия накопленных в процессе эксплуатации напряжений, способствует укрупнению субзерен феррита и снижению микродеформаций. В результате релаксации микронапряжений достигнуто снижение микротвердости поверхности на 30 % и восстановление упругопластических характеристик материала лопаток. Коэффициент восстановления упругопластических свойств, определенный из релаксационных испытаний, составляет ~90 %.

На основании анализа постэксплуатационного состояния материала разработана **ремонтно-восстановительная технология** компрессорных лопаток, в основу которой положены следующие принципы:

- ◆ удаление поверхностного дефекта слоя;
- ◆ восстановление объемных свойств материала;
- ◆ упрочнение рабочей поверхности лопаток;



♦ защита рабочей поверхности лопаток от питтинговой коррозии.

В технологический цикл входят:

- электроимпульсная обработка;
- механическая обработка;
- восстановительная термообработка;
- нанесение полифункционального покрытия.

В качестве защитных покрытий для компрессорных лопаток предложены ионно-плазменные покрытия на основе нитрида титана, наносимые методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ).

Свойства ионно-плазменных покрытий определяются совокупностью технологических параметров, основными из которых являются ток дуги, опорное напряжение, парциальное давление реакционного газа, температура подложки.

В целях оптимизации режима формирования износостойкого и коррозионно-стойкого защитного покрытия исследованы структура, физико-механические и коррозионные свойства покрытий нитрида титана, полученных в широком интервале технологических параметров. Наиболее детально изучены закономерности формирования нитридных покрытий в зависимости от парциального давления реакционного газа (азота) в камере.

В целях оптимизации режима формирования антикоррозионного покрытия изучены коррозионные свойства нитрида титана, полученного в интервале низких парциальных давлений реакционного газа (0,04...0,1 Па).

Установлено, что в исследуемом диапазоне давлений осаждаются покрытия, имеющие фазовый состав δ -TiN + α -Ti. С уменьшением давления газа выявлена тенденция появления аксиальной текстуры типа (001). Получены наноструктурированные покрытия TiN с размером кристаллитов 25...28 нм (см. таблицу). При снижении давления реакционного газа до 0,04 Па формируются покрытия с повышенным уровнем микродеформаций в зернах TiN и, как следствие, с более высокой микротвердостью.

Покрытия не проявляют микрохрупкости при индентировании, и полученные в интервале давлений 0,06...0,1 Па имеют высокий показатель пластичности $\delta_n = 0,81...0,84$ %. Это выгодно отличает их от защитных гальванических покрытий твердого хрома ($\delta = 0,77$ % при таких же значениях твердости), имеющих склонность к растрескиванию при знакопеременных нагрузках.

Параметры субструктуры и механические характеристики покрытий нитрида титана, полученные при разных парциальных давлениях реакционного газа

Давление газа p , Па	Величина микродеформаций $\varepsilon \pm 0,01$, нм	Размер субзерен $D \pm 2$, нм	Микротвердость $H_{\mu} \pm 0,3$, ГПа	Коэффициент пластичности δ_n , %
0,04	0,34	27	16,6	0,67
0,06	0,08	27	8,2	0,84
0,08	0,02	28	9,6	0,81
0,10	0,02	25	8,4	0,83

С точки зрения антикоррозионной защиты, наиболее оптимально получение покрытия при давлении 0,1 Па. Нанесение ионно-плазменного покрытия TiN в указанном режиме на поверхность стальных образцов способствовало существенному повышению потенциала E_p питтингообразования и базисов питтингостойкости ΔE_p , ΔE_{rep} .

Нитрид титана в данном случае выполняет функцию катодного покрытия, наносимого на стальную основу.

Таким образом, нанесение ионно-плазменных покрытий TiN обеспечивает существенное повышение коррозионной стойкости стальных поверхностей. В результате проведенной комплексной восстановительно-упрочняющей технологии с применением ионно-плазменных покрытий нитрида титана на лопатках, отработавших назначенный ресурс, достигнуто:

- повышение микротвердости рабочей поверхности компрессорных лопаток в 5–7 раз;
- улучшение антикоррозионных свойств по показателю питтингостойкости в 3–5 раз;
- восстановление упругопластических свойств материала на 90 %;
- повышение эрозионной стойкости поверхности лопаток на 25 %;
- увеличение предела выносливости деталей в целом до 360...380 МПа по сравнению с 300...340 МПа для новых лопаток;
- продление общего срока службы компрессорных лопаток в 1,8–2 раза.

Усталостные испытания восстановленных компрессорных лопаток с ионно-плазменными покрытиями нитрида титана показали полное восстановление предела выносливости.



Технология внедрена на предприятиях ООО "Волготрансгаз" и ООО "Севергазпром" ОАО "Газпром" для продления срока службы компрессорных лопаток газотурбинных двигателей ГТК-25И, ГТК-10И. В настоящее время 32 комплекта (29 500 шт.) восстановленных лопаток находятся в эксплуатации и отработали 20...48 тыс. ч.

На примере жаропрочного никелевого сплава ЦНК-7РС изучено постэксплуатационное состояние лопаток турбины низкого давления (ТНД) газотурбинного двигателя ГТК-25И с фактической наработкой 21 000 ч. Лопатки ТНД изготавливают методом точного литья из жаропрочного никелевого сплава, представляющего собой твердый раствор легирующих элементов, карбидных и интерметаллидных фаз в никелевой матрице. Располагаясь по границам зерен металла, они приводят к упрочнению материала и обеспечению жаропрочных свойств.

После эксплуатации обнаружены изменения в микроструктуре поверхностного слоя лопаток глубиной 40 мкм. В результате двигательного воздействия среды горючих газов в условиях высоких температур на рабочей поверхности пера лопаток образуется окисный слой и коррозионные дефекты полусферической формы (глубиной 5...20 мкм). Рентгеновским фазовым анализом установлено образование в поверхности оксикарбидных фаз: Ni_3C , WC , Cr_3C_2 , $NiCr_2O_4$.

В процессе эксплуатации происходит постепенный распад интерметаллидного соединения Ni_3Al . Изменения зарегистрированы в тонкой структуре зерен основного металла. Под действием знакопеременных рабочих напряжений в материале протекают процессы пластической деформации, приводящие к размельчению субзерен, образующих зерно никеля. Более чем на порядок возрастает плотность линейных дефектов на их границах.

Послойным рентгеновским сканированием установлено, что максимальная концентрация дефектов дислокационного типа соответствует глубине ~3 мкм. Изменения субструктуры затрагивают поверхностный слой спинки пера, замковой части и зону входной кромки лопаток. Возрастает по величине и микродеформации в зернах основного металла. Микронапряжения в замковой и перовой части лопатки увеличиваются в 1,7 и в 2,7 раза соответственно. Внутреннее же сечение металла пера по параметрам субструктуры практически соответствует исходному состоянию.

Установлено значительное (до 60 %) увеличение микротвердости материала рабочей поверхности. Это свидетельствует о деформационном старении в

микрообъемах сплава в процессе эксплуатации. Выявлена корреляция профиля микротвердости от глубины с послойным распределением плотности дислокаций на границах субзерен никеля. Максимум твердости наблюдается на глубине ~1,5 мкм. Затем твердость плавно снижается до значений исходного состояния.

Из профиля микротвердости по поперечному шлифу установлена глубина деформационно-упрочненного слоя (~100 мкм). Из значений микротвердости упрочненной зоны и основного металла (8800 МПа и 4500 МПа соответственно) определены показатели пластичности. Установлено, что в результате многократного механического и термического нагружения в процессе эксплуатации коэффициент пластичности материала поверхностного слоя пера лопатки ТНД снижается с $\delta_n = 0,88 \%$ (в исходном состоянии) до $\delta_n = 0,63 \%$. Известно, что при $\delta_n < 0,75 \%$ в металлах и сплавах значительно возрастает вероятность хрупкого разрушения.

Механические свойства (предел прочности σ_b , относительное удлинение δ , ударная вязкость a_n , микротвердость H_n) во внутренних слоях пера и замка остаются практически неизменными и соответствуют нормативно-техническим требованиям.

Таким образом, при фактической наработке ~21 тыс. ч в материале лопаток ТНД развиваются процессы старения, проявляющиеся в деформационном упрочнении поверхностного слоя, деградации микро- и субструктуры. Дальнейшая эксплуатация лопаток будет продолжаться за счет уменьшения запаса пластичности и увеличения вероятности хрупкого разрушения.

Разработана **технология восстановления эксплуатационных свойств материала и продления общего ресурса** лопаток ТНД, которая базируется на следующих принципах:

- удаление дефектного поверхностного слоя методами механической и пескоструйной обработки;
- восстановление микроструктуры, выравнивание химической и фазовой неоднородности сплава посредством регенерирующей термической обработки (ТО);
- восстановление формы и геометрических размеров лопаток методами наплавки;
- повышение теплозащитных свойств и защита от высокотемпературной газовой коррозии за счет диффузионных жаростойких покрытий.

Разработаны режимы восстановительной термической обработки (ТО) для разных марок жаропрочных никелевых сплавов (ЦНК-7РС, U 500). Данные



рентгенографии показали, что после термообработки в никелевой матрице возрастает количество упрочняющей интерметаллидной фазы Ni_3Al , обеспечивающей жаропрочные свойства сплава.

Испытания механических свойств после термообработки показали улучшение основных показателей механических свойств пера лопатки, а именно повышение характеристик прочности и пластичности при незначительном снижении микротвердости. Следует отметить, что коэффициент пластичности материала восстанавливается относительно исходного состояния в среднем на 92 % и выравнивается по лопатке, находясь в интервале значений $\delta_n = 0,80...0,82$ для перовой и замковой части соответственно (для материала в исходном состоянии до эксплуатации $\delta_n = 0,88$ %).

Эффективность от применения данного подхода подтверждена испытаниями лопаток ТНД из жаропрочного никелевого сплава ЦНК-7РС на длительную прочность, проведенными в соответствии с ГОСТ 10145–81 при температуре 900 °С и рабочем напряжении 250 МПа. По результатам испытаний применение восстановительной ТО для лопаток, отработавших назначенный ресурс, дает увеличение работоспособности материала по показателю времени до разрушения на 18 % (с 16,7 до 19,7 ч).

В настоящее время лопатки ТНД изготавливают без покрытий. Нанесение диффузионных жаростойких покрытий обеспечивает дополнительный эффект повышения жаропрочности. *Разработанная технология внедрена в ООО "Волготрансгаз" и ООО "Волгоградтрансгаз" ОАО "Газпром". По данной технологии восстановлено девять комплектов рабочих лопаток ТВД для газоперекачивающих агрегатов ГТК-10И, которые в настоящее время находятся в эксплуатации.*

На примере жаропрочного никелевого сплава In 738 изучено постэксплуатационное состояние лопаток турбины высокого давления (ТВД) газотурбинного двигателя газоперекачивающего агрегата ГТК-10И. Установлено, что наиболее подвержена воздействию высокотемпературного газового потока зона верхней части спинки пера около входной кромки. Наблюдается разрыхление металла и разупрочнение металла. Твердость HV в этой зоне может снижаться ниже нормируемых значений (до 1600...2300 МПа).

Разработаны **режимы регенерирующей термообработки** для восстановления микроструктуры жаропрочных никелевых сплавов In 738, ЗМИ–3У. После проведения восстановительной термиче-

ской обработки сплав In 738 приобретает более однородную микроструктуру с выделениями мелкодисперсных (~4 мкм) карбидных и боридных фаз. Возрастает объемное содержание (до 67 %) упрочняющей интерметаллидной γ' -фазы различной дисперсности (50...250 нм).

Рентгеноструктурным анализом установлено, что после восстановительной ТО уровень микродеформаций в сплаве уменьшается на порядок, а плотность дислокаций внутри субзеренных блоков снижается на два порядка. Это отражает снижение внутренних напряжений в материале и положительное влияние процесса регенерации на его структурное состояние в целом. Размер кристаллитов γ' -фазы превышает 500 нм.

Зернограничная структура сплава имеет первоначальное значение при интеркристаллитном разрушении. Искривленные границы, образующиеся в процессе термической обработки, способствуют повышению жаропрочности благодаря торможению процессов межзеренного проскальзывания.

Термообработка оказывает положительное влияние на изменение основных механических характеристик сплава, а именно повышает предел прочности в 1,4 раза, относительное удлинение – в 1,3 раза по сравнению с постэксплуатационным состоянием.

Разработана **технология восстановления эксплуатационных свойств материала и продления общего ресурса лопаток ТНД**, включающая:

- механическую обработку;
- наплавку;
- восстановительную термообработку;
- нанесение комбинированного жаростойкого покрытия методом плазменного напыления.

Многослойная структура поверхности лопатки после ремонтно-восстановительной обработки представляет собой композицию "основа материала + подслоя + жаростойкое покрытие на основе γ' -фазы + керамическое теплозащитное покрытие на основе диоксида циркония".

Разработанная технология внедрена в ООО "Волготрансгаз" и ООО "Волгоградтрансгаз" ОАО "Газпром". По данной технологии восстановлено 23 комплекта рабочих лопаток ТВД для газоперекачивающих агрегатов ГТК-10И, которые в настоящее время находятся в эксплуатации.

Разработанные технологии являются ресурсосберегающими, так как позволяют продлить общий срок службы лопаток в 1,8...2 раза.



Техническое обслуживание оборудования.

Продолжение*

Перечислены типовые объемы работ по техническому обслуживанию и ремонтам энергетического оборудования и сетей. Приведены данные по нормам трудоемкости ремонтов, простоя, продолжительности ремонтного цикла и межремонтного периода.

Typical volume of works by servicing, energy equipment repair and grid repair has been remitted. Guidelines of repair work content, delays, repair cycle time and inter-repair time have been provided.

Ключевые слова: ремонт, трубопровод, трудоемкость.

Key words: repair, tubing, labor content.

9. Ремонт трубопроводов

Номенклатура трубопроводов

В ремонтные нормативы входят промышленные трубопроводы следующего назначения:

- 1) наружные и внутренние сети водопровода холодной и горячей воды;
- 2) воздухопроводы сжатого воздуха;
- 3) газопроводы;
- 4) бензопроводы;
- 5) мазутомаслопроводы;
- 6) отопительные сети;
- 7) тепловые сети;
- 8) паропроводы;
- 9) конденсатопроводы;
- 10) канализация фекальная и производственная.

Отдельно приводятся нормативы на промышленную трубопроводную арматуру, тепловые пункты и водоподогреватели.

Эксплуатацию и ремонт трубопроводов и арматуры производят с соблюдением правил техники безопасности и технических условий.

Эксплуатацию и ремонт трубопровода паром давлением свыше 0,2 МПа (2 кгс/см²) и горячей водой температурой свыше 120 °С производят с соблюдением "Правил устройства и безопасной экс-

плуатации трубопроводов пара и горячей воды", а газораспределительные сети и сооружения должны удовлетворять "Правилам безопасности в газовом хозяйстве".

Предприятия, получающие тепло от ТЭЦ или районных котельных, должны соблюдать правила эксплуатации и ремонта, действующие в данной системе.

Указанными правилами предусматривается техническое обслуживание, текущий и капитальный ремонты, на которые ниже приведены ремонтные нормативы.

Все системы трубопроводов, подлежащие регистрации в местных органах Госгортехнадзора, должны иметь паспорта, в которые эксплуатационный персонал записывает обнаруженные дефекты и производственные ремонтные работы.

Типовой объем работ по техническому обслуживанию и ремонту

В объем технического обслуживания входят следующие работы:

- 1) наружный осмотр трубопроводов для выявления неплотностей в сварных стыках и фланцевых соединениях и состояния теплоизоляции и антикоррозионного покрытия;
- 2) осмотр и мелкий ремонт трубопроводной арматуры при рабочем положении;
- 3) смена запорной арматуры и маховичков;
- 4) перебивка сальников и замена душевых сеток;
- 5) проверка работы конденсатоотводчиков и теплового пункта;
- 6) регулировка отопительной системы;
- 7) проверка состояния маслководоотделителей, установленных на воздухопроводах сжатого воздуха и спуск из них конденсата;
- 8) проверка состояния канализационных выпусков и плотности раструбов.

Кроме указанных работ по наружным трубопроводам производят:

- 1) проверку состояния колодцев и колонн эстакады;

*Начало см. "Сборка в машиностроении, приборостроении", № 4, 5, 7, 8, 2008.



- 2) протяжку фундаментальных креплений колонн подвижных и неподвижных опор трубопровода;
- 3) замену отдельных скоб;
- 4) ремонт лестниц;
- 5) проверку состояния пожарных гидрантов;
- 6) проверку плотности соединений газопровода в колодцах с помощью мыльной эмульсии;
- 7) проверку устройств электрозащиты трубопроводов.

По канализационным сетям осуществляют устранение засоров и проверяют работу нейтрализаторов и жируловителей.

По водоподогревателям проверяют плотность крышек, арматуры и работу измерительных приборов.

Результаты осмотра должны быть внесены в карту ремонта.

В типовой объем работ при текущем ремонте входят:

- 1) все работы по техническому обслуживанию;
- 2) устранение выявленных дефектов при осмотре трубопроводов и замена отдельных участков трубопроводов в размере не более 20 % его протяженности;
- 3) частичная замена фланцев, прокладок и вышедшей из строя арматуры;
- 4) смена сальниковой набивки в арматуре и компенсаторах;
- 5) ремонт подвижных и неподвижных опор трубопровода, термоизоляции и восстановление антикоррозионного покрытия;
- 6) испытание на плотность;
- 7) гидравлические испытания на прочность;
- 8) частичная окраска.

Дополнительно производят следующие работы для:

- ♦ **воздухопроводов сжатого воздуха** — очистка системы трубопроводов от масляных отложений 5%-ным раствором каустической соды с последующей промывкой горячей водой, ремонт масловодоотделителей;
- ♦ **отопительных сетей** — промывка системы трубопроводов, замена отдельных групп радиаторов или ребристых труб, регулировочной арматуры, ремонт сливных и воздушных труб, вантузов и расширительных баков, ремонт теплового пункта;
- ♦ **наружных трубопроводов** — ремонт колодцев, металлических колонн эстакады; частичная замена крепежных деталей, ремонт подвижных и неподвижных опор, термоизоляции и ее верхнего покрытия; проверка и ремонт пожарных гидрантов;

ремонт и частичная замена электроаппаратуры в электрозащитном устройстве;

- ♦ **канализационных сетей** — ремонт системы трубопроводов нейтрализаторов и жируловителей; ремонт колодцев и ливневых лотков;

- ♦ **арматуры** — разборка, очистка и промывка всех деталей, замена изношенных деталей; притирка клапанов и пробок кранов; перебивка сальников; проверка работы приводной головки и ее ремонт;

- ♦ **водоподогревателей** — внутренний осмотр в целях выявления состояния змеевиков у емкостных подогревателей, частичная замена трубок, замена прокладок и крепежных деталей; ремонт термоизоляции и арматуры.

В типовой объем работ при капитальном ремонте входят:

- 1) работы текущего ремонта;
- 2) разборка пришедшего в негодность и прокладка нового трубопровода основных магистралей в размере 20 % и более протяженности данного участка;
- 3) замена арматуры, фланцев, прокладок сальниковых компенсаторов;
- 4) замена подвижных и неподвижных опор, полное восстановление антикоррозионного покрытия и термоизоляции;
- 5) гидравлическое испытание со сдачей местным органам Госгортехнадзора;
- 6) окраска трубопроводов в цвета, соответствующие их назначению.

Дополнительно производят следующие работы для:

- **воздухопроводов** — замена масловодоотделителей; ремонт осушителей воздуха у потребителя и их перезарядка; определение утечки воздуха в целом по всей системе воздухопроводов до и после ремонта;
- **наружных трубопроводов** — замена металлических колонн, подверженных сильной коррозии; замена верхнего покрытия термоизоляции, прокладка верхней части колодцев, замена скоб и лестниц; ремонт шкафа электрозащиты трубопроводов, кабельных сетей трансформатора, низковольтной аппаратуры;
- **канализационных сетей** — проверка наличия соответствующих уклонов и при необходимости перекладка труб на магистральных участках; ремонт колодцев и лотков;
- **арматуры** — полная разборка арматуры; замена или ремонт отдельных деталей; расточка флан-

**19. Продолжительность ремонтного цикла и межремонтного периода**

Наименование трубопроводов	Продолжительность ремонтного цикла, лет	Продолжительность межремонтного периода, мес.
Наружный водопровод и канализация из чугунных труб	20	24
То же из стальных труб	15	
То же из асбоцементных труб	10	12
Наружные воздухопроводы, газопроводы, бензопроводы и маслосмазопроводы	12	
Наружные тепловые сети	15	
Внутренние сети водопровода, отопления, канализации, горячего водоснабжения и паропроводов:		18
в нормальных условиях	15	
в агрессивной среде и при переувлажнении	12	
при вибрационных и других динамических нагрузках	10	
Внутренние сети воздухопровода, газопровода, бензопровода и маслосмазопровода	16	12
Трубопроводная арматура	5	6
Водоподогреватели емкостные	4	
Эстакады и колонны для воздушной прокладки трубопроводов	12	12

цевых поверхностей и поверхностей клапанных седел; замена зубчатых пар приводных головок, ремонт или замена приводного механизма и электродвигателя;

- **водоподогревателей** – полная разборка, очистка от накипи и шлама; замена змеевиков у емкостных водоподогревателей.

После капитального и текущего ремонтов трубопроводы пара и горячей воды подвергаются испытаниям в объеме, установленном "Правилами устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды", а газопроводы – в объеме, установленном "Правилами безопасности в газовом хозяйстве".

**Продолжительность
ремонтных циклов
и межремонтных периодов**

Продолжительность планово-предупредительных ремонтов (ППР) для наружных и внутренних трубопроводов водопровода, канализации, тепловодов и сетей отопления принята на основании "Положения о проведении планово-предупреди-

тельных ремонтов сооружений общепромышленного назначения", разработанного Госстроем СССР при условии непрерывной работы трубопроводов, и приведена в табл. 19.

Продолжительность ремонтного цикла трубопроводов из полиэтиленовых труб, гуммированных и футерованных винилпластом, полиэтиленом и фторопластом, приравнивают к ремонтному циклу трубопроводов из стальных труб внутренних и наружных сетей с коэффициентом 0,75.

Трубопроводы пара и горячей воды, зарегистрированные в Госгортехнадзоре, подвергаются техническому освидетельствованию инженером-инспектором в следующие сроки:

- 1) наружный осмотр не реже 1 раза в 3 года;
- 2) наружный осмотр и гидравлическое испытание – перед пуском вновь смонтированного трубопровода в работу;
- 3) наружный осмотр и гидравлическое испытание – после ремонта, связанного со сваркой стыков, а также при пуске трубопровода после нахождения его в состоянии консервации более 2 лет.



20. Нормы трудоемкости ремонта трубопроводов различного назначения

Назначение трубопровода	Вид ремонта	Норма трудоемкости, чел.-ч на 100 м трубопровода диаметром, мм									
		до 25	50	75	100	150	200	250	300	400	500
Наружные трубопроводы											
Водопровод (проложенный в траншее) из чугунных труб	Капитальный	—	20	—	30	37	45	53	67	88	103
	Текущий	—	6	—	9	11	13	16	20	27	31
То же из асбоцементных труб	Капитальный	—	—	—	25	30	38	45	57	74	80
	Текущий	—	—	—	8	9	11	13	16	22	24
Водопровод, воздухопровод сжатого воздуха, газопровод, бензопровод из стальных труб с противокоррозионной окраской, проложенных в траншеях, проходных и непроходных каналах	Капитальный	—	19	22	25	29	33	47	55	77	88
	Текущий	—	5	5	6	7	8	12	14	18	22
Тепловые сети, паропроводы и конденсаторопроводы, проложенные на эстакадах, по стенам зданий и в проходных каналах	Капитальный	—	50	70	95	120	150	200	220	250	300
	Текущий	—	12	18	25	30	40	50	60	60	80
То же, проложенные в непроходных каналах	Капитальный	—	42	60	80	100	130	170	190	210	250
	Текущий	—	10	15	20	25	30	40	50	50	60
Масломазутопроводы с изоляцией и обогревом, проложенные в непроходных каналах	Капитальный	35	40	50	70	90	—	—	—	—	—
	Текущий	9	10	12	18	22	—	—	—	—	—
Канализация фекальная и производственная из чугунных труб	Капитальный	—	17	—	25	31	38	44	56	73	86
	Текущий	—	5	—	7	9	11	13	17	21	25
То же из керамических труб	Капитальный	—	—	—	—	27	34	40	50	65	78
	Текущий	—	—	—	—	8	10	12	15	19	23
То же из асбоцементных труб	Капитальный	—	—	—	17	24	30	36	45	59	70
	Текущий	—	—	—	5	7	9	11	13	17	21
Внутренние трубопроводы											
Водопровод холодной и горячей воды, воздухопроводы сжатого воздуха, трубопроводы системы отопления без изоляции	Капитальный	20	30	40	55	70	90	110	130	—	—
	Текущий	5	7	10	15	17	22	26	32	—	—
Газопроводы и бензопроводы	Капитальный	26	40	52	70	90	100	112	—	—	—
	Текущий	6	10	12	17	22	28	33	—	—	—
Паропроводы, конденсаторопроводы, теплопроводы, масломазутопроводы с обогревом и изоляцией	Капитальный	30	42	60	80	105	130	160	180	—	—
	Текущий	7	10	15	20	26	32	40	45	—	—
Канализация фекальная и производственная из чугунных труб	Капитальный	—	30	—	40	52	65	75	95	—	—
	Текущий	—	7	—	10	12	16	20	25	—	—

**21. Нормы трудоемкости ремонта промышленной трубопроводной арматуры**

Арматура	Вид ремонта	Норма трудоемкости, чел.-ч, на единицу арматуры диаметром условного прохода, мм												
		15	25	50	70	80	100	125	150	200	250	300	400	500
Краны водяные, паровые и газовые	Капитальный	2	3	4	6	8	10	12	14	—	—	—	—	—
	Текущий	0,5	0,7	1	1,5	2	2,5	3	3,5	—	—	—	—	—
Краны трехходовые	Капитальный	—	4	5	7	9	12	—	—	—	—	—	—	—
	Текущий	—	1	1,2	1,7	2,2	3	—	—	—	—	—	—	—
Клапаны запорные для воды, пара и газа	Капитальный	3	4	5	7	9	10	11	13	15	—	—	—	—
	Текущий	0,7	1	1,2	1,7	2,2	2,5	2,7	3,1	3,8	—	—	—	—
Клапаны регулирующие	Капитальный	6	8	10	14	18	20	22	26	—	—	—	—	—
	Текущий	1,4	2	2,5	3,4	4,4	5	5,5	6	—	—	—	—	—
Клапаны обратные подъемные и приемные	Капитальный	—	4	5	6	8	9	10	12	14	16	22	—	—
	Текущий	—	1	1,2	1,5	2	2,2	2,5	3	3,5	4	5,5	—	—
Клапаны предохранительные	Капитальный	3	5	7	9	10	12	13	14	—	—	—	—	—
	Текущий	0,7	1,2	1,7	2,2	2,5	3	3,1	3,5	—	—	—	—	—
Клапаны редуционные	Капитальный	—	10	14	—	20	22	26	30	—	—	—	—	—
	Текущий	—	2,5	3,5	—	5	5,5	6,2	7,5	—	—	—	—	—
Клапаны регулирующие питательные	Капитальный	—	—	18	—	21	25	—	30	40	—	—	—	—
	Текущий	—	—	4,4	—	5,3	6,3	—	7,5	10	—	—	—	—
Задвижка для воды, пара и газа	Капитальный	—	—	6	8	10	12	—	15	20	23	27	32	40
	Текущий	—	—	1,5	2	2,5	3	—	3,8	5	5,8	6,8	8	10
Конденсатоотводчики	Капитальный	3,5	7	10	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	Текущий	0,9	1,7	2,5	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Приводные головки вентилей и задвижек	Капитальный	—	—	—	—	—	10	13	18	26	30	—	—	—
	Текущий	—	—	—	—	—	2,5	3,1	4,4	6,2	7,5	—	—	—

Примечания: 1. Нормы трудоемкости составлены для фланцевой трубопроводной арматуры. Для муфтовой арматуры вводится коэффициент 0,9.

2. К трудоемкости ремонта арматуры, предназначенной для коррозионной среды, вводят коэффициент 1,3, а для арматуры, предназначенной для вакуумной среды, — коэффициент 1,5.

3. К трудоемкости ремонта аммиачных вентилей вводят коэффициент 2.

Ремонтные нормативы

В табл. 20 приведены нормы трудоемкости по видам ремонта сварных трубопроводов различных назначений и условий их прокладки на давление до 2,5 МПа (25 кгс/см²) и без учета ремонта промышленной трубопроводной арматуры. Трудоемкость

ремонта наружных трубопроводов приведена без учета земляных и строительных работ.

При пользовании указанными нормами необходимо учитывать следующее:

1) трудоемкость ремонта трубопроводов, смонтированных на фланцевых соединениях, принимают с коэффициентом 1,1, а для трубопроводов на



22. Нормы трудоемкости ремонта санитарно-технического оборудования, водоразборной арматуры и оборудования центрального отопления и горячего водоснабжения

Оборудование и арматура	Норма трудоемкости, чел.-ч	
	капитально-го ремонта	текущего ремонта
Тепловые пункты, оборудованные элеватором с выходным проходом, мм:		
50	50	12
82	70	18
100	87	22
Радиаторы секционные отопительные на 10 секций	—	5
Трубы чугунные ребристые длиной 2 мм на одну трубу	—	6
Водоподогреватели пароводяные емкостью, л:		
до 1000	20	5
1600	30	7
2500	40	10
4000	50	12
Пожарные гидранты на 1 шт.	20	5
Смесители для душевых установок на 1 шт.	—	2
Краны водозаборные на 1 шт.	—	1
Компенсаторы сальниковые диаметром, мм:		
100	35	9
250	70	17
400	100	25

Примечания: 1. Норму трудоемкости технического обслуживания в течение одного месяца принимают равной 10 % нормы текущего ремонта.

2. В нормах предусмотрены станочные работы в размере 10 и 5 % соответственно при капитальном и текущем ремонтах.

давление более 2,5 МПа (25 кгс/см²) — с коэффициентом 1,2;

2) трудоемкость ремонта трубопроводов из полиэтиленовых труб, гуммированных, футерован-

23. Нормы простоя из-за ремонта

Трудоемкость ремонта, чел.-ч	Простой при капитальном ремонте, сут	Простой при текущем ремонте, ч
До 25	1,0	3
50	1,5	7
100	2,5	10
150	4,0	16
200	6,0	24
250	7,0	30
300 и более	8,0	40

Примечание. Нормы простоя приведены при выполнении ремонтных работ в две смены. При трехсменной работе к нормам простоя вводят коэффициент 0,75, а при односменной — коэффициент 2.

ных полиэтиленом, винипластом и фторопластом, принимают с коэффициентом 1,15;

3) к трудоемкости ремонта трубопроводов из газовых труб, смонтированных на фитингах, вводят коэффициент 0,85.

Ежемесячно на каждую рабочую смену для технического обслуживания трубопроводов и арматуры планируют трудоемкость в размере 8 % трудоемкости текущего ремонта.

В нормах предусмотрены станочные работы в размере 10 и 5 % соответственно при капитальном и текущем ремонтах, а также теплоизоляционные 30 %.

Нормативы времени на ремонт промышленной трубопроводной арматуры приведены в табл. 21, а для санитарно-технического оборудования и оборудования горячего водоснабжения и отопления — в табл. 22.

В табл. 23 приведены нормы простоя из-за ремонта, которые применяют лишь для трубопроводов, работающих круглогодично. Для промышленной трубопроводной арматуры санитарно-технического оборудования и приборов отопления время простоя из-за ремонта не планируют.

Библиографический список

1. **Справочник** механика. Нижний Новгород: Изд-во "Вента-2", 2001.

ПОДГОТОВКА СПЕЦИАЛИСТОВ

С.П. Стольников, канд. техн. наук, В.Н. Подлеснов, канд. техн. наук
(Волгоградский ГТУ)

Подготовка специалистов в области технологии ремонта оборудования

Предложена апробированная в Волгоградском государственном техническом университете методика подготовки специалистов по специальности "Металлообрабатывающие станки и комплексы" в области технологии ремонта оборудования.

The technique of expert's preparation, in a trade "Machine tools and complexes", approved in the Volgograd state technical university in the field of technology of the equipment repair is offered.

Ключевые слова: подготовка, специалист, металлообработка, ремонт, рейтинг.

Key words: training, expert, metal-working, renewal, rating.

Цели и задачи преподавания учебных дисциплин в вузе следует рассматривать в рамках подготовки студентов к следующим видам будущей деятельности:

- проектно-конструкторская;
- научно-исследовательская;
- организационно-управленческая;
- производственно-технологическая;
- испытательная;
- эксплуатационная.

Инженер по специальности **"Металлообрабатывающие станки и комплексы"** должен обладать знаниями во всех перечисленных областях. Поскольку их будущая деятельность связана с металлообработкой, то особое значение приобретает подготовка в области ремонта оборудования. Учебная дисциплина по вопросам технологии ремонта базируется на многих общеинженерных и специальных дисциплинах, является по своей сути комплексной, позволяющей получить необходимые и глубокие знания по устройству станков, взаимодействию их составных частей, сборке-разборке, по технологии восстановления деталей и технологии их изготовления для ремонта в единичном производстве.

Значение изучения вопросов ремонта оборудования возрастает и из-за положения, сложившегося

в промышленности. В силу ограниченных финансовых возможностей предприятий, их стремления экономно расходовать свои ресурсы возникает необходимость больше внимания уделять вопросам восстановления и увеличения ресурса действующего технологического оборудования. Вопросы ремонта и восстановления работоспособности оборудования имеют отношение ко всем перечисленным выше видам деятельности.

Рассмотрим роль и содержание учебной дисциплины **"Технология ремонта металлорежущих станков"** в качестве одного из средств формирования профессиональных компетенций специалиста. В Волгоградском государственном техническом университете (ВолГТУ) дисциплина "Технология ремонта металлорежущих станков" читается на пятом курсе для студентов, обучающихся по специальностям **"Металлообрабатывающие станки и комплексы"**. Общий объем этой дисциплины по учебному плану – 119 ч, в том числе аудиторная работа – 51 ч, самостоятельная работа студентов – 68 ч. Аудиторные занятия включают 34 ч лекций и 17 ч лабораторно-практических занятий.

Трудности преподавания названной дисциплины связаны с потерей многих баз практики на крупных машиностроительных предприятиях, проблемами с приобретением современного металлорежущего и диагностического оборудования.

В создавшихся условиях возникла необходимость пересмотреть традиционные подходы к изучению курса "Технология ремонта металлорежущих станков" с тем, чтобы обеспечить уровень подготовки специалистов, соответствующий требованиям государственных образовательных стандартов.

На кафедре **"Металлорежущие станки и инструменты"** ВолГТУ в рабочей программе дисциплины отмечается, что в машиностроении возрастает доля прогрессивных высокопроизводительных станков, конструкции которых непрерывно совершенствуются в направлении резкого повышения статической и динамической жесткости, точности движений, скоростей и подач, автоматизации, надежно-



сти, долговечности и ремонтпригодности. Поэтому целью преподавания дисциплины "Технология ремонта металлорежущих станков" является изучение технологии машиностроения, общих вопросов эксплуатации и ремонта станочного парка, технологии монтажа станков, методов восстановления и упрочнения деталей при ремонте, прогрессивных методов ремонта, включая сборку и разборку, проверку станков после ремонта.

Студентам разъясняют, что сложные технические задачи, стоящие перед ремонтными службами предприятий в современных условиях, требуют внимания к кадрам ремонтных служб. Изучение данной дисциплины должно способствовать подготовке квалифицированных инженерно-технических кадров по обслуживанию и ремонту металлорежущих станков. Конечно, лишь небольшая часть выпускников трудоустраивается на работу в ремонтные службы предприятий. Однако данную дисциплину нельзя рассматривать только в узко-профессиональном, а тем более во вспомогательном плане, поскольку она призвана дополнять и расширять знания и практические навыки, полученные на таких курсах, как "Технология машиностроения" и "Металлорежущие станки".

С учетом имеющихся трудностей экономического характера, ограниченного количества баз практики, а также положения, сложившегося в реальном секторе экономики, в частности в машиностроении, в университете особое внимание уделяют лабораторно-практическим занятиям и самостоятельной работе студентов.

На лабораторных занятиях студенты приобретают практические навыки по выполнению элементов ремонтных работ и по оформлению технической документации. Тематика лабораторных работ включает в себя проверку геометрической точности токарно-винторезного станка, ремонт шпиндельной бабки, составление паспорта станка и др.

Лабораторная работа по ремонту предполагает разборку шпиндельной бабки, сортировку деталей, выявление (визуальное и инструментальное) износа деталей, составление дефектной ведомости и разработку мероприятий по ремонту изношенных деталей. При этом студенты ориентируются на разработку альтернативных вариантов ремонта с учетом поставленных преподавателем конкретных производственных условий: особенности ремонтного производства, наличие определенного (в том

числе ограниченного) набора технологического оборудования и инструмента.

На практических занятиях большое внимание уделяют индивидуализации занятий. Студенты заранее получают такие задания, как, например, "Исследование кинематической точности зубообрабатывающего станка", "Ремонт и восстановление пары винт-гайка качения станка с ЧПУ", "Восстановление подшипников скольжения" и др. На практических занятиях обсуждают рефераты, подготовленные по индивидуальным заданиям.

Практическую подготовку завершает выполнение студентами семестрового задания по разработке технологического процесса механической обработки какой-либо детали для ремонтных целей. Повышение эффективности задания достигается его индивидуализацией путем постановки определенных условий, связанных с типом производства, видом применяемого оборудования и инструмента, требованиями к точности и качеству поверхностей и др.

Отдельные семестровые работы после их углубления и расширения могут быть использованы при выполнении соответствующих разделов дипломных работ.

Все учебные дисциплины в ВолгГТУ оценивают в рейтинговой системе. На текущую успеваемость отводится до 60 баллов, на экзамен – до 40. Отдельные виды учебных поручений – лабораторные работы, выполнение индивидуальных заданий и др. – оценивают определенным интервалом баллов, учитывающие сложность задания, степень самостоятельности при выполнении стандартных и творческих работ и др.

Многолетний опыт использования рейтинговой системы в ВолгГТУ показал ее высокую эффективность и объективность в отношении дифференцированной оценки знаний студентов, возникновение мотивации ритмичной работы в семестре.

Изучив дисциплину "Технология ремонта металлорежущих станков", выпускник университета обладает элементами профессиональных компетенций, включающих следующие значения:

- производственный и технологический процессы;
- факторы, влияющие на точность механической обработки;
- приспособления, применяемые при ремонтных работах;



- организация планово-предупредительного ремонта металлорежущих станков;
- износ деталей и мероприятия по повышению долговечности металлорежущих станков;
- основные виды слесарных ремонтных работ;
- современные методы восстановления и упорочнения деталей при ремонте станков;
- технология изготовления и ремонта деталей станков;
- типовые технологические процессы ремонта станков основных групп (токарных, фрезерных, зубообрабатывающих и др.);
- основы технологии сборки станков после ремонта;
- проверка станков на точность и жесткость после ремонта и сдача их в эксплуатацию;
- окраска станков после ремонта.

В рамках приобретения профессиональных компетенций студент получает навыки использования основных приспособлений и инструментов, которые применяются в процессе ремонта станков.

По нашим оценкам, примерно 30 % выпускников получают необходимые твердые знания и практические навыки для работы в ремонтных службах предприятий.

В целом же совокупность всех описанных учебных и методических приемов и мероприятий позволяет обеспечить необходимый уровень профессиональных компетенций в области устройства станков, технологии механической обработки, ремонта и сборки, что в большой степени определяет качество подготовки специалистов по специальности "Металлообрабатывающие станки и комплексы" и позволяет им найти свое место на рынке труда.

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

по ГОСТ Р ИСО 20806–2007. *Продолжение*

Меры безопасности для машин некоторых классов

Класс машин	Пример машины данного класса	Меры безопасности
Турбины	Паровая или газовая турбина	Перед остановкой турбины для добавления корректирующих масс или нанесения фазовой метки следует убедиться, что приняты меры по предотвращению изгиба вала. Обычно для этого валу позволяют некоторое время вращаться для постепенного выравнивания температуры. Срок эксплуатации ротора может уменьшаться с увеличением числа пусков машины. Это необходимо учитывать при определении стратегии балансировки на месте
Электродвигатели	Двигатель для высокопроизводительного вентилятора	Некоторые электродвигатели имеют ограничение на допустимое число пусков в час. Набор скорости электродвигателем от нулевого до максимального значения может быть неконтролируемым. Поэтому пробные массы следует выбирать таких размеров, чтобы они не могли вызвать повреждение машин даже в случае установки их в неправильном положении
Насосы	Питательный насос парового котла	Для безопасной работы некоторых насосов необходимо, чтобы они постоянно были заполнены жидкостью. Это требование следует соблюдать и при выполнении балансировки на месте
Крупные вентиляторы	Высокопроизводительный приточно-вытяжной вентилятор	Поток, создаваемый вентилятором в процессе балансировки, должен оставаться правильно распределенным. Например, если для проведения балансировки необходимо перекрыть заслонку вентилятора, то это может привести к срыву потока. Жидкости, подаваемые вентилятором в процессе работы, могут быть горячими или содержать вредные вещества, поэтому следует исключить доступ персонала к вентилятору (например, для установки корректирующих масс) до тех пор, пока условия работы не станут безопасными
Электрогенераторы	Электрогенератор с водородным охлаждением и приводом от паровой или газовой турбины	Для генераторов справедливо все, указанное выше для турбин. Для облегчения доступа к внутренним плоскостям коррекции может потребоваться замена водорода обычным воздухом. Однако для большинства генераторов существуют ограничения на продолжительность пуска и максимальную частоту вращения при работе в воздушной среде даже в отсутствие напряжения и нагрузки. Эти ограничения должны быть соблюдены в процессе балансировки. Необходимо убедиться, что система гидроуплотнения обеспечит необходимое качество смазки уплотнения при работе в воздушной среде. Для облегчения доступа к внутренним плоскостям коррекции может потребоваться демонтаж некоторых внутренних пластин охлаждения. При этом следует убедиться, что демонтаж не приведет к существенному снижению качества охлаждения генератора

УДК 621.793.7:533.9:621.919

А.А. Черепакхин, канд. техн. наук, В.М. Виноградов, канд. техн. наук, Э.Е. Смирнова (МГТУ "МАМИ")

Выбор СОЖ для высокоскоростного протягивания наружных фасонных поверхностей

Рассмотрены особенности воздействия смазывающе-охлаждающих жидкостей (СОЖ) на условия резания при круговом протягивании наружных фасонных поверхностей.

Приведены данные по оптимальным СОЖ для протягивания заготовок из конструкционных сталей по критериям минимальной силы резания при протягивании; минимальной шероховатости обработанной поверхности; наибольшей стойкости при различных скоростях резания.

Features of influence of GCL on conditions of cutting are considered at circular broaching external shaped surfaces.

The data on optimum GCL for broaching preparations from constructional steels by criteria are given: the minimal force of cutting at broaching; the minimal roughness of the processed surface; the greatest cutting power various speeds of cutting.

Ключевые слова: смазывающе-охлаждающая жидкость, протяжка, круговое протягивание, износ, стойкость, сталь.

Key words: Lubricating and cooling liquid, broach, circular broaching, wear, cutting power, steel.

Смазывающе-охлаждающие жидкости (СОЖ) являются необходимым элементом процесса резания, обеспечивающим уменьшение силы резания, повышение точностных параметров обработанной поверхности.

Однако в технической литературе подробно рассмотрены вопросы влияния и выбора оптимальных СОЖ для точения, сверления, фрезерования и обычного протягивания (скорость резания до 18 м/мин).

До последнего времени считалось, что повышение скорости протягивания ограничивается инерционными массами исполнительных механизмов (поршень и шток гидроцилиндра, захваты протяжки и сама протяжка).

Однако появление кругового протягивания (отсутствуют дискретные возвратно-поступательные

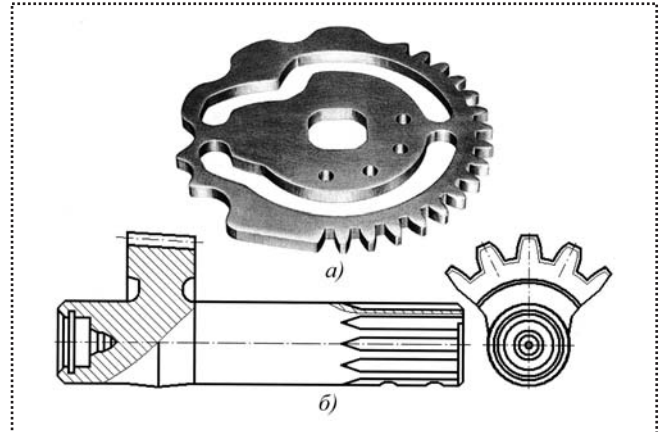


Рис. 1. Зубчатые секторы:

а – плоские насадные; б – на валах

движения) позволяет повысить скорость протягивания до 60 м/мин.

Круговое протягивание позволяет обрабатывать наружные фасонные поверхности: зубчатые венцы цилиндрических и конических колес, зубчатые секторы, зубчатые диски трения. Высокая стоимость круговых протяжек, применение метода копирования определяют область их применения – крупносерийное и массовое производство.

В автотракторной промышленности только в России ежегодно производится свыше 100 млн цилиндрических и конических зубчатых колес различных типов. Подавляющее их большинство работает в трансмиссиях автомобилей, тракторов и комбайнов. Так, в автомобильных трансмиссиях используют колеса более 300 наименований с суммарным годовым выпуском более 35 млн шт., в тракторных трансмиссиях – колеса 170 наименований, в комбайнах – колеса 12 наименований. Годовые программы выпуска колес одного наименования исчисляются десятками и сотнями тысяч штук.

Кроме того, в механизмах машин находят применение детали с зубчатыми секторами (рис. 1), специфические конструктивные особенности которых затрудняют использование при их изготовлении традиционных способов зубонарезания.

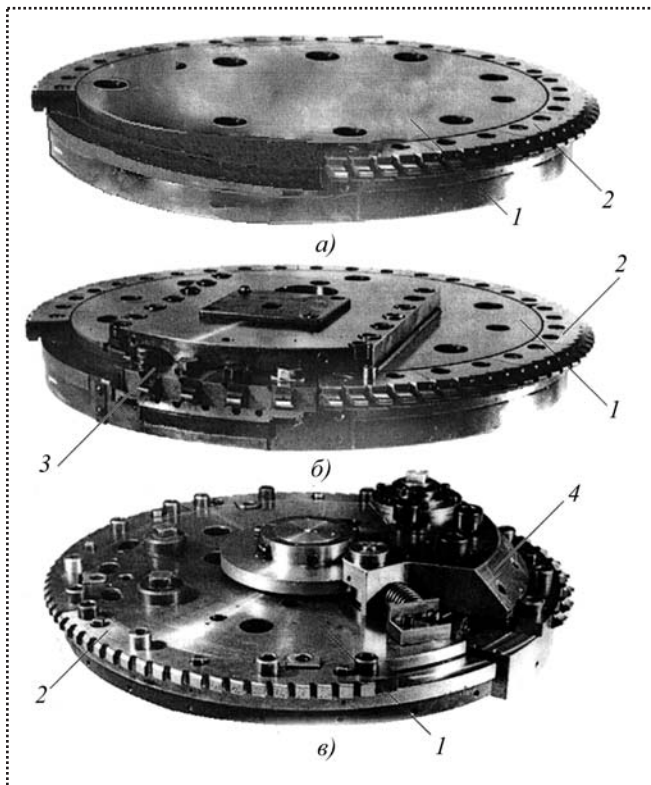


Рис. 2. Инструменты для кругового протягивания:
а – фреза-протяжка; *б* – кругодиагональная протяжка; *в* – протяжка с подвижным качающимся элементом; *1* – корпус; *2* – резовые блоки; *3, 4* – подвижные элементы (соответственно ползун и качалка)

В технологической лаборатории МГТУ "МАМИ" разработано несколько вариантов инструментов (рис. 2) кругового протягивания наружных фасонных поверхностей.

Все инструменты для кругового протягивания состоят из массивного дискообразного корпуса *1* диаметром 550...850 мм, на периферии которого устанавливаются резовые блоки *2*. У кругодиагональной протяжки чистовые резовые блоки размещают на подвижном элементе – ползуне *3*.

Во время работы протяжка равномерно вращается вокруг своей оси.

Прямолинейное перемещение чистовых зубьев относительно обрабатываемой поверхности у фрезо-протяжек обеспечивается за счет возвратно-поступательного перемещения заготовки относительно оси протяжки. У остальных протяжек эта прямолинейность обеспечивается возвратно-поступательным или возвратно-качательным перемещением или ползуна, или качалки.

Резцовые блоки – наиболее дорогостоящая часть круговых протяжек. Стоимость комплекта

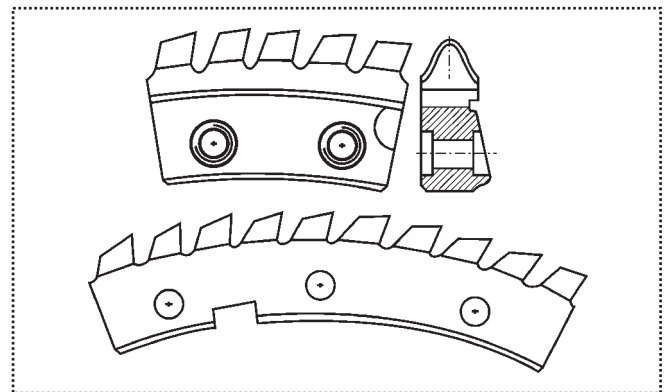


Рис. 3. Резцовые блоки

блоков (рис. 3) соизмерима со стоимостью твердосплавных червячных фрез.

Протяжки имеют две группы сменных режущих блоков: черновые и чистовые, выполненные из быстрорежущих сталей P18, P5M5K5 и с напайными пластинками из твердого сплава T14K8.

Каждый из черновых блоков имеет от пяти до десяти затылованных резцов с угловым шагом, равным 4° . Передний угол черновых зубьев составляет 15° , а чистовых – 0 или 15° . Угловой шаг между зубьями чистовых блоков равен 8° . Угол затылования для всех резцов одинаков и составляет 10° . Особенности кругового протягивания, определяющими физику процесса резания и, соответственно, применение СОЖ, являются:

- высокая скорость резания 20...60 м/мин;
- малое время резания одним зубом протяжки 0,01...0,08 с;
- время остывания каждого резца примерно в 30 раз превышает время резания (за один оборот инструмента);
- большие силы резания – главная составляющая силы резания доходит до 20 кН на один режущий зуб;
- большая жесткость инструмента и системы станок – приспособление – деталь – инструмент в целом;
- при черновом прорезании впадин толщина стружки остается постоянной по всей длине резания;
- износ резцов по передней поверхности характеризуется наличием небольшой лунки (глубина 0,05...0,06 мм) на передней поверхности. По мере углубления лунки ее радиус уменьшается, что ухудшает отделение стружки от резца и приводит к интенсификации наростообразования. Кроме того, налипание стружки на передней поверхности



вызывает переполнение впадины между зубьями, что приводит к поломке отдельных резцов. Эти явления устраняют применением обильной подачи СОЖ (не менее 60 л/мин) и специальных устройств для принудительного удаления стружки из межзубового пространства;

- высокая точность профиля обработанной поверхности;

- высокая производительность процесса: в 2–10 раз выше, чем при фрезеровании.

В этих условиях *основное назначение СОЖ* – уменьшить силу резания и износ зубьев протяжки, обеспечить требуемое качество обработанной поверхности.

Работы академика П.А. Ребиндера и проф. И.В. Крагельского показали, что эффективное применение СОЖ возможно при следующих условиях:

- поверхностно-активные вещества, входящие в состав СОЖ, проникают в зону деформации по плоскостям скольжения в отдельных зернах обрабатываемого металла и тем самым облегчают процесс пластической деформации срезаемого слоя;

- продукты распада адсорбированных поверхностно-активных веществ внедряются в кристаллическую решетку наиболее деформированных зерен металла, переводя его в более хрупкое состояние, что приводит к уменьшению величины предельной пластической деформации срезаемого слоя перед разрушением и уменьшению работы резания;

- адсорбированные пленки СОЖ проникают в зону резания несмотря на высокие давления на границе передняя поверхность – корень стружки.

В технологической лаборатории МГТУ "МАМИ" была проведена попытка подбора оптимальной СОЖ для кругового протягивания.

Исследования были проведены в три этапа.

1. Анализ условий для эффективного применения СОЖ на основе изучения микрофотографий зоны резания.

2. Выбор критериев эффективного применения СОЖ.

3. Подбор наиболее эффективной СОЖ.

Учитывая невозможность относительно быстрого прерывания процесса резания при круговом протягивании, микрофотографии получены на процессе, имитирующем протягивание: строгании (процесс резания каждым резцом протяжки – это, с точки зрения теории резания, строгание).

Микрофотография процесса строгания в несвободных условиях резания приведена на рис. 4.

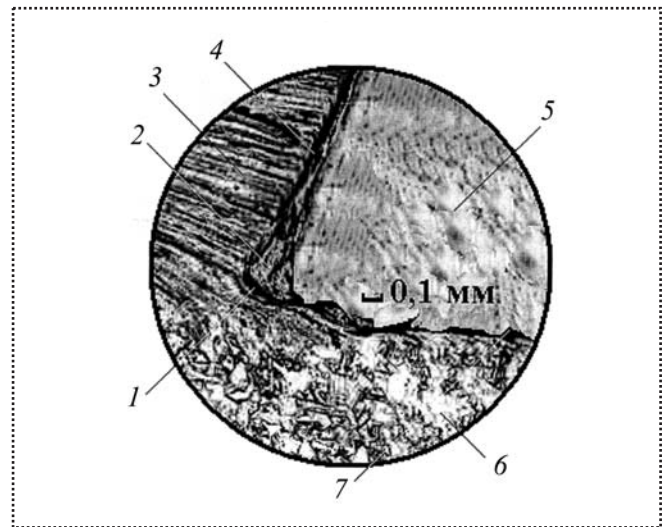


Рис. 4. Микрофотография зоны контакта передней поверхности режущего клина со стружкой (имитация процесса протягивания со скоростью резания 40 м/мин, материал заготовки – сталь 45, материал режущего клина – быстрорежущая сталь P18):

1, 4, 7 – полости в зоне резания у передней и задней поверхностей; 2 – нарост; 3 – капилляры в теле стружки; 5 – режущий клин; 6 – заготовка

Анализ микрофотографий показал наличие следующих явлений:

- при скоростях резания, характерных для кругового протягивания, контакт передней и задней поверхностей режущего клина и обрабатываемого материала несплошной. Вся зона контакта насыщена мельчайшими капиллярами 3 и микропустотами (вакуумные полости) 4, 7, через которые СОЖ может проникнуть к поверхностям контакта режущего лезвия с обрабатываемым материалом;

- при образовании на передней поверхности режущего клина нароста также возможно проникновение адсорбированных пленок СОЖ к передней поверхности режущего клина за счет образования вакуумных полостей 1 в результате частичного разрушения нароста. Однако малое время контакта режущего клина с материалом заготовки не позволяет развиваться наросту и вакуумным полостям 1 до значительных размеров, не обеспечивает эффективного влияния СОЖ на наростообразование при круговом протягивании.

Критериями оптимизации выбора СОЖ являлись:

- соответствие СОЖ санитарно-гигиеническим требованиям;

- минимальная сила резания P_z ;

- минимальная шероховатость обработанной поверхности и максимальная стойкость круговых протяжек.

Широко применяемые на отечественных машиностроительных предприятиях сульфозеолы не удовлетворяют санитарно-гигиеническим требованиям из-за повышенного содержания серы или фосфора и не позволяют избежать интенсивного адгезионного схватывания в местах контакта поверхностей инструмента со стружкой и обработанной поверхностью.

Малое время резания одним зубом протяжки, а следовательно, относительно малое тепловыделение говорят о том, что от СОЖ не требуется охлаждающий эффект, основное требование – обеспечение смазывающего и диспергирующего эффектов. Поэтому для экспериментов были выбраны масляные СОЖ марок ЛЗ-СОЖ-1МП, ЛЗ-СОЖ-15 (ЗАО "Невская смазочная компания"), СОЖ МР-7 (ЗАО "Заречье" г. Нижний Новгород) и СОЖ-3М. ЛЗ-СОЖ-1МП, ЛЗ-СОЖ-15 и СОЖ МР-7 представляют собой композицию антифрикционных, противозадирных, противоизносных и противопенных присадок, растворенных в минеральном масле. Они рекомендованы для обработки легированных сталей протягиванием. СОЖ-3М – 20%-ный раствор концентратов ЛЗ-26МО в индустриальном масле И-20А.

Исследования проводились при обработке образцов из сталей марок 45, 25ХГТ, 12Х2Н4А, 30ХГСА, 30ХГСНА круговой протяжкой диаметром 550 мм, резцовые блоки – цельные из стали Р18 и с напайными пластинками из твердого сплава Т14К8. Скорость резания – 25, 32 и 50, 60 м/мин; подъем на зуб: черновые зубья – 0,15...0,2 мм, чистовые зубья – 0,05 мм. Стойкость зубьев протяжки определялась по допустимому износу 0,8 мм по задней поверхности.

Экспериментальное исследование влияния вязкости СОЖ на силы резания при круговом протягивании позволили сделать следующие выводы:

- при чистовом резании (подъем на зуб 0,02...0,07 мм) преобладает смазочный эффект СОЖ и лучшие результаты дало применение вязких СОЖ ЛЗ-СОЖ-1МП, СОЖ-3М и СОЖ МР7;
- при получистовом резании (подъем на зуб 0,08...0,1 мм) увеличивается нормальная составляющая силы резания по передней поверхности, уменьшается сечение капиллярных каналов и ухудшаются условия для проникновения адсорби-

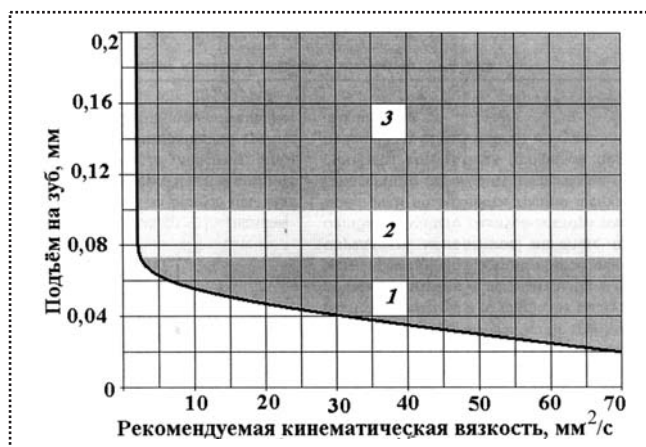


Рис. 5. Рекомендации по оптимальной кинематической вязкости СОЖ по критерию минимальной силы резания: 1 – зона чистовой обработки; 2 – зона получистовой обработки; 3 – зона черновой обработки

рованных пленок СОЖ к передней поверхности режущего клина;

- при черновом резании (подъем на зуб более 0,1 мм) наиболее эффективной оказалась маловязкая ЛЗ-СОЖ-15, в состав которой входят поверхностно-активные вещества. Эти вещества, адсорбируясь на обрабатываемой поверхности, обеспечивают локализацию деформации сдвига в тонких пластифицированных слоях материала заготовки.

Анализ экспериментальных зависимостей силы P_z от подъема на зуб позволил дать рекомендации по оптимальной кинематической вязкости СОЖ по критерию минимальной силы резания (рис. 5).

По критерию наименьшей шероховатости обработанной поверхности наиболее эффективными оказались следующие СОЖ:

- при обработке хромистых сталей – ЛЗ-СОЖ-15; при обработке хромомарганцевых сталей – СОЖ МР7;
- при обработке стали 45 – ЛЗ-СОЖ-1МП.

Полученные результаты показывают, что для уменьшения шероховатости обработанной поверхности необходимо проводить дополнительные исследования для каждой конкретной марки стали.

Стойкостные испытания, проведенные как в технологической лаборатории МГТУ "МАМИ", так и в производственных условиях, показали следующее:

- при чистовом резании наблюдается абразивный износ режущего клина (рис. 6, а);
- при черновом резании происходит скалывание зерен с режущих кромок (см. рис. 6, б, в). При этом сколы являются очагами повышенного изно-

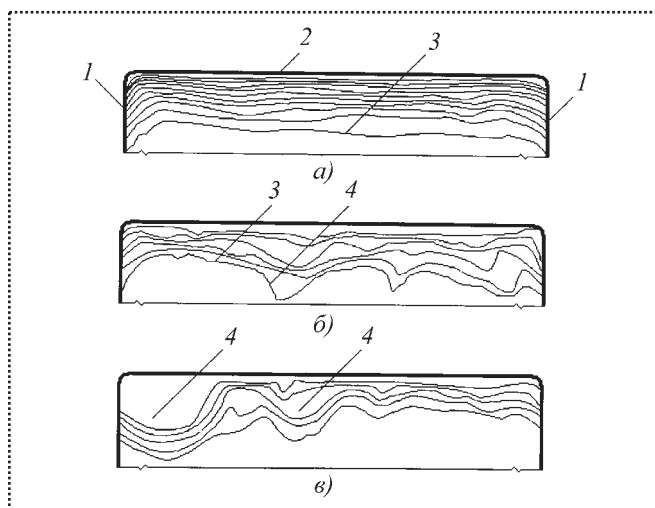


Рис. 6. Изолинии площадки износа по задней поверхности:
a – абразивный износ; *b* – совмещение абразивного износа и скалывания; *v* – скалывание; 1, 2 – блоковые и вершинная режущие кромки; 3 – изолиния площадки абразивного износа; 4 – скол

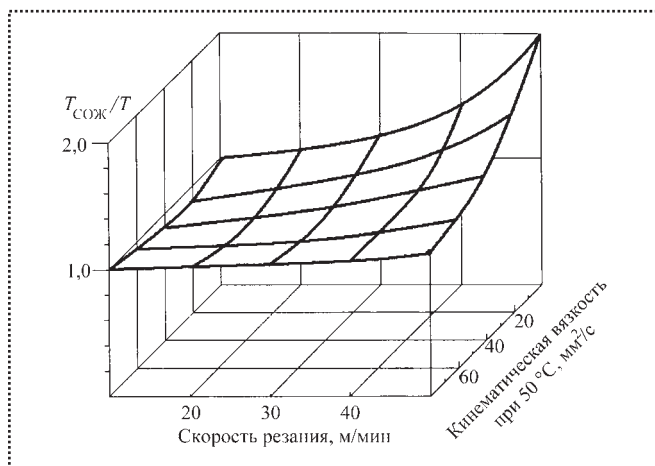


Рис. 7. Влияние вязкости масляных СОЖ на относительную стойкость протяжек T_{COJ}/T :
 T – стойкость протяжки при резании без СОЖ; T_{COJ} – стойкость протяжки с применением СОЖ

са, что приводит к 4–5-кратной потере стойкости. Наиболее вероятны сколы по уголкам зубьев, поэтому при заточке инструмента необходимо притуплять уголки, что позволит уменьшить вероятность появления сколов.

Исследование влияния СОЖ на стойкость протяжек при повышенных скоростях резания показало, что применение вязких масляных СОЖ при скоростях 30 м/мин и более не препятствует прилипанию стружки на переднюю поверхность зубьев протяжки, одновременно при этом наблюдается

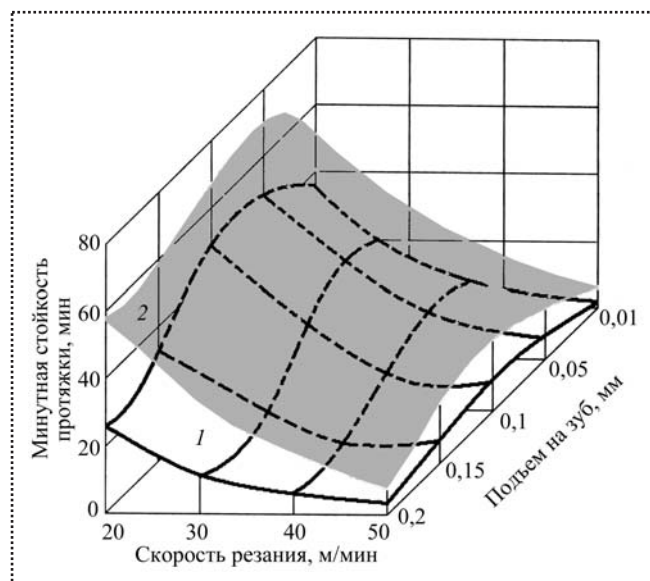


Рис. 8. Минутная стойкость протяжки при применении СОЖ-3М:

1 – протягивание без применения СОЖ; 2 – протягивание с применением СОЖ-3М

увеличение радиуса завивания стружки и уменьшение ее усадки.

Лучшие результаты были получены при использовании маловязких масляных СОЖ (рис. 7).

По критерию стойкости протяжки наилучшие результаты показала СОЖ-3М: повышение стойкости протяжки по сравнению с другими СОЖ в 1,5...2 раза. Повышение стойкости происходило в основном за счет уменьшения выкрашивания по уголкам главной режущей кромки и за счет уменьшения износа по задней поверхности (рис. 8).

Выводы

1. При чистовом протягивании (критерий уменьшения силы резания) и скоростях резания до 30 м/мин необходимо применять вязкие масляные СОЖ.
2. При черновом протягивании (критерий повышения стойкости) эффективно применение маловязких СОЖ.
3. При низких скоростях резания (до 30 м/мин) эффективно применение вязких масляных СОЖ.
4. По комплексному показателю наиболее эффективна СОЖ-3М.
5. Для обеспечения наименьшей шероховатости поверхности необходимо подбирать СОЖ для каждой конкретной стали.

Методические указания по балансировке жестких роторов (к ГОСТ 22061–76 "Машины и технологическое оборудование. Система классов точности балансировки. Основные положения").* Продолжение**

Методические указания содержат теоретические основы построения и практического применения системы классов точности балансировки и предназначены для инженеров-расчетчиков, конструкторов и технологов, разрабатывающих нормативно-техническую документацию на балансировку "жестких роторов" (по терминологии ГОСТ 19534–74) при изготовлении или ремонте изделий.

Методические указания должны помочь избежать грубых ошибок при разработке и проведении процесса балансировки и при установлении единообразного порядка, который вводит ГОСТ 22061–76, соответствующий международному стандарту ИСО 1940.

В первой части особое внимание обращено на методы расчетов и способ определения, является ли ротор данного изделия "жестким ротором".

Во второй части рассмотрены примеры различных технологических дисбалансов, их расчет и связь с точностью изготовления, а также приведены практические рекомендации.

Methodical directions contain construction and practical application theory of balance grades system and meant for design engineers, planners which develop technological normative documents by balance of "rigid rotors" (by nomenclatures the GOST 19534–74) when in use production or repair product.

Methodical directions must help to avoid gross errors by development, balancing and arrangement of uniform method which coincided GOST 22061–76 and ISO 1940.

The first part consist of methods of analysis and method of determining rotor such as "rigid rotor". The second part consist of different technologic disbalances, their calculation and connection with accuracy of manufacturing, practical guidances have been reduced.

Ключевые слова: балансировка, жесткий ротор.

Key words: balancing, rigid rotor.

Часть 1

Теоретические основы

Раздел 1. Неуравновешенность

1.1. Тело, не подверженное действию внешних сил, вращающееся с постоянной угловой скоростью ω вокруг одной из своих главных центральных осей инерции, находится в состоянии динамического равновесия, которое характеризуется равенством нулю векторной суммы всех неуравновешенных сил \vec{F}_i и всех моментов \vec{M}_i этих сил:

$$\Sigma \vec{F}_i = \Sigma m_i \vec{r}_i \omega^2 = m_{\text{рот}} \vec{e}_{\text{ст}} \omega^2 = 0; \quad (1)$$

$$\Sigma \vec{M}_i = \Sigma [l_i \vec{F}_i] = \Sigma m_i [l_i \vec{r}_i] \omega^2 = 0, \quad (2)$$

где \vec{r}_i – эксцентриситет i -й массы m_i ;

$m_{\text{рот}}$ – масса ротора, состоящая из всех деталей, которые вращаются в собранном изделии как одно целое;

$\vec{e}_{\text{ст}}$ – удельный дисбаланс;

l_i – расстояние от оси вращения тела до массы m_i .

Можно представить на этом теле цапфы и подшипниковые опоры строго концентричные с его главной центральной осью инерции, тогда это тело превратится в ротор и сохранит свою уравновешенность.

Однако практически изготовление цапф и установка подшипников-опор всегда будут произведены с радиальной и угловой погрешностями относительно главной центральной оси инерции тела. В этом случае абсолютно жесткие опоры заставляют ротор вращаться уже вокруг другой **оси ротора**, не совпадающей с его главной центральной осью инерции.

Вследствие этого ротор станет в общем случае **динамически неуравновешенным** (рис. 1), т.е. нарушаются равенства (1) и (2).

Пусть ротор – абсолютно твердое тело. Параллельное смещение оси такого ротора относительно его главной центральной оси инерции будет опре-

*Редакция 1993 г.

**Начало см. журнал "Сборка в машиностроении, приборостроении", № 3, 4, 6, 8, 2008 г.

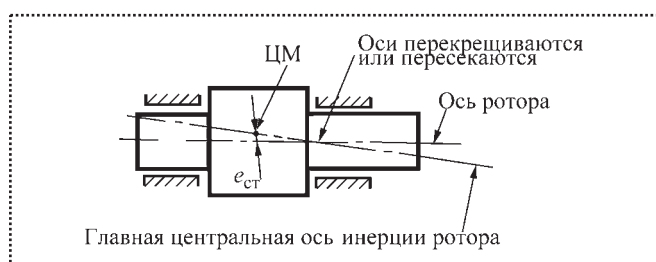


Рис. 1. Динамически неуравновешенный ротор:
ЦМ – центр масс

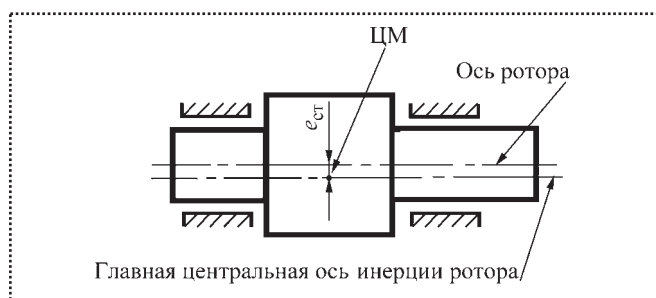


Рис. 2. Статически неуравновешенный ротор

делять **статическую неуравновешенность** ротора (рис. 2), характеризуемую выражением

$$\Sigma \bar{F}_i = m_{\text{рот}} \bar{e}_{\text{ст}} \omega^2 \neq 0. \quad (3)$$

Угол между осью ротора и его главной центральной осью инерции будет вызывать **моментную неуравновешенность** (рис. 3), которую характеризуют выражением

$$\Sigma \bar{M}_i = \Sigma m_i [\bar{l}_i \bar{r}_i] \omega^2 \neq 0. \quad (4)$$

Как при статической, так и при моментной неуравновешенностях, вращающийся с постоянной угловой скоростью ротор будет нагружать опоры силами, которые вращаются вместе с ротором. Эти переменные по направлению нагрузки опор создают изгибающие моменты, действующие на ротор и вращающиеся вместе с ним.

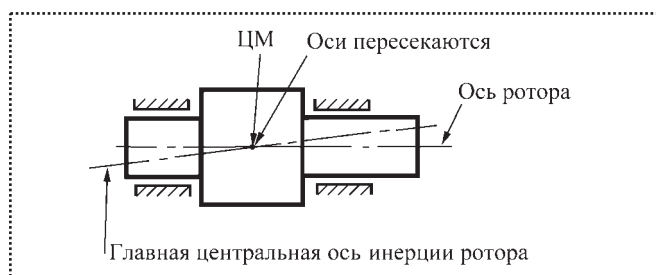


Рис. 3. Моментная неуравновешенность ротора

Разделим выражения (3) и (4) на ω^2 , тогда

$$\frac{\Sigma \bar{F}_i}{\omega^2} = \Sigma \bar{D}_i = m_{\text{рот}} \bar{e}_{\text{ст}} = \bar{D}_{\text{ст}} \neq 0; \quad (5)$$

$$\frac{\Sigma \bar{M}_i}{\omega^2} = \bar{M}_D = [\bar{L} \bar{D}_M] \neq 0, \quad (6)$$

где $\bar{D}_{\text{ст}}$ – главный вектор дисбалансов ротора;

\bar{M}_D – главный момент дисбалансов ротора, создаваемый на плече L (расстояние между опорами) парой дисбалансов \bar{D}_M ;

$\bar{D}_i = m_i \bar{r}_i$ – локальный дисбаланс.

Раздел 2. Балансировка

2.1. **Балансировка** – это технологический процесс совмещения главной центральной оси инерции с осью ротора.

2.2. Балансировку можно проводить *двумя методами*.

2.2.1. **Обработкой цапф** так, чтобы ось вращения ротора, обычно проходящая через центры сечений цапф, совпала с главной центральной осью инерции ротора. Подобная методика балансировки, чаще всего использующая электролиз, теоретически наиболее оправдана и практически дает хорошие результаты, особенно при не очень больших начальных дисбалансах. Однако этот способ, требующий коренного изменения привычного процесса балансировки, еще мало применяют.

2.2.2. **Корректировкой масс**, при которой *корректирующие массы* перемещают по ротору, устанавливают на нем или удаляют с него таким образом, чтобы главная центральная ось инерции приблизилась к оси ротора. Перемещение, добавление или удаление корректирующей массы производят в одной или нескольких точках одной *плоскости коррекции*, перпендикулярной оси ротора, либо в нескольких параллельных плоскостях коррекции одновременно или последовательно в каждой плоскости.

Перемещение, добавление или удаление корректирующих масс можно проводить сверлением, фрезерованием, наплавкой, наваркой, завинчиванием или вывинчиванием винтов, выжиганием электрической искрой, лучом лазера, электронным пучком, электролизом, электромагнитным наплавом и т.д.

2.3. Процесс балансировки может быть *последовательным*, когда измерение дисбаланса и его уменьшение составляют самостоятельные операции, и *совмещенный*, когда измерение и корректировку масс совершают одновременно.

Раздел 3. Динамическая неуравновешенность

Если рассматривать две плоскости, перпендикулярные оси ротора и проходящие через середины опор A и B межопорного ротора, то главный вектор дисбалансов может быть заменен его составляющими в плоскостях опор (рис. 4), которые называют *симметричными дисбалансами*:

$$\bar{D}_{ctA} = \bar{D}_{ct} \frac{L_B}{L}; \quad \bar{D}_{ctB} = \bar{D}_{ct} \frac{L_A}{L}, \quad (7)$$

а главный момент – парой дисбалансов, действующих в тех же плоскостях, которые называют *кососимметричными дисбалансами*:

$$\bar{D}_{MA} = -\bar{D}_{MB}, \quad (8)$$

где $D_M = \frac{M_D}{L}$;

L_A, L_B – расстояние от ЦМ до опор A и B соответственно.

Таким образом, в каждой из плоскостей опор будут действовать суммарные векторы дисбалансов:

$$\begin{aligned} \bar{D}_A &= \bar{D}_{ctA} + \bar{D}_{MA}; \\ \bar{D}_B &= \bar{D}_{ctB} + \bar{D}_{MB}. \end{aligned} \quad (9)$$

Эти два вектора вместо векторов \bar{D}_{ct} и \bar{M}_D также полностью определяют динамическую неуравновешенность ротора.

В общем случае составляющие \bar{D}_{ctA} и \bar{D}_{ctB} главного вектора дисбалансов ротора имеют разные значения, параллельны друг другу и лежат в плоскости, содержащей ось ротора Z_{rot} и центр его масс, тогда как векторы дисбалансов \bar{D}_{MB} и \bar{D}_{MA} , определяющие главный момент дисбалансов ротора, равны по значению, противоположно направлены, параллельны и лежат в другой плоскости, содержащей центральную ось инерции Z ротора и его главную центральную ось инерции Z_0 , причем ось Z параллельна оси ротора Z_p (см. рис. 4).

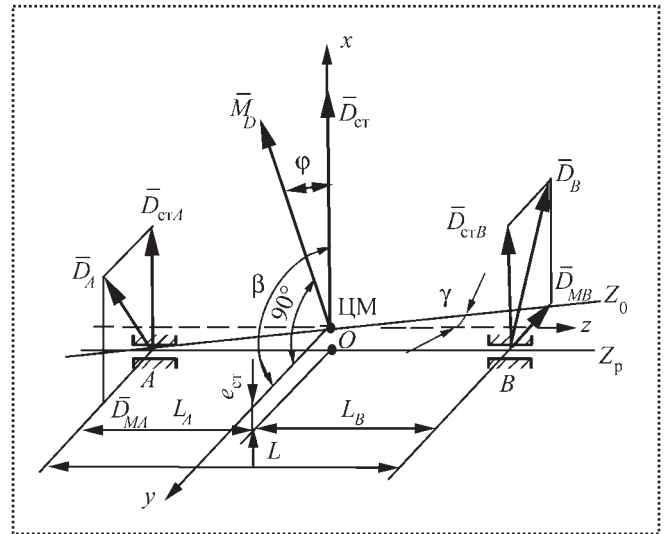


Рис. 4. Схема распределения сил:

Z – центральная ось инерции ротора; Z_0 – главная центральная ось инерции ротора; Z_p – ось ротора; β – угол поворота \bar{D}_{ct} относительно оси Y ; ϕ – угол поворота \bar{D}_{ct} относительно \bar{M}_D ; γ – угол поворота оси Z относительно оси Z_0

Первое векторное равенство (9) можно представить в координатной форме

$$D_{AX} = D_{ctX} \frac{L_B}{L} + D_{MAX}; \quad D_{AY} = D_{ctY} \frac{L_B}{L} + D_{MAY},$$

откуда

$$D_A^2 = D_{ct}^2 \left(\frac{L_B}{L} \right)^2 + D_{MA}^2 + 2 \frac{L_B}{L} (D_{ctX} D_{MAX} + D_{ctY} D_{MAY}).$$

Аналогично

$$D_B^2 = D_{ct}^2 \left(\frac{L_A}{L} \right)^2 + D_{MB}^2 + 2 \frac{L_A}{L} (D_{ctX} D_{MBX} + D_{ctY} D_{MBY}).$$

Так как

$$\bar{D}_{MB} = -\bar{D}_{MA}; \quad D_{MA} = D_{MB} = D_M = \frac{M_D}{L}; \quad \bar{D}_M \perp \bar{M}_D,$$

то

$$\begin{aligned} D_A^2 &= \frac{1}{L^2} [D_{ct}^2 L_B^2 + M_D^2 + \\ &\quad + 2 L_B (D_{ctX} M_{DY} + D_{ctY} M_{BY})]; \\ D_B^2 &= \frac{1}{L^2} [D_{ct}^2 L_A^2 + M_D^2 - \\ &\quad - 2 L_A (D_{ctX} M_{DY} + D_{ctY} M_{DX})]. \end{aligned} \quad (10)$$



Выражения (10) пригодны для роторов из абсолютно твердых материалов, самой произвольной формы, вращающихся на абсолютно жестких опорах.

Раздел 4. Динамическая неуравновешенность симметричного межопорного ротора

4.1. Рассмотрим ротор из абсолютно твердого материала на абсолютно жестких опорах, симметричный относительно своей главной центральной оси инерции Z_0 . У такого ротора любая центральная ось инерции, перпендикулярная Z_0 , может быть принята за главную центральную ось инерции X_0 .

Выберем ось X_0 таким образом, чтобы она была перпендикулярна плоскости, в которой лежит угол γ между главной центральной осью инерции Z_0 и осью Z_p ротора (см. рис. 4).

В этом случае вектор \bar{M}_D лежит на оси X_0 и компонента главного момента дисбалансов по этой оси $M_{DX} = M_D$, а компонента $M_{DY} = 0$.

Следовательно, для симметричного ротора из абсолютно твердого материала на абсолютно жестких опорах уравнения (10) упрощаются:

$$D_A^2 = \frac{1}{L^2}(D_{ct}^2 L_B^2 + M_D^2 + 2D_{ct Y} L_B M_D);$$

$$D_B^2 = \frac{1}{L^2}(D_{ct}^2 L_A^2 + M_D^2 - 2D_{ct Y} L_A M_D),$$

где D_A, D_B – дисбалансы в опорах A и B соответственно (см. рис. 4).

Из рис. 4 следует, что

$$D_{ct Y} = D_{ct} \sin \varphi = D_{ct} \cos \beta,$$

где φ – угол между \bar{D}_{ct} и \bar{M}_D ;

β – угол между плоскостью, в которой лежат вектора \bar{D}_M и \bar{D}_{ct} .

Таким образом,

$$D_A^2 = \frac{1}{L^2}(D_{ct}^2 L_B^2 + M_D^2 + 2D_{ct} L_B M_D \sin \varphi); \quad (11)$$

$$D_B^2 = \frac{1}{L^2}(D_{ct}^2 L_A^2 + M_D^2 - 2D_{ct} L_A M_D \sin \varphi).$$

На рис. 5 показаны различные варианты одной и той же неуравновешенности.

Если известны (измерены) \bar{D}_A и \bar{D}_B ("крест дисбалансов") (см. рис. 5, а) в плоскостях опор A и B

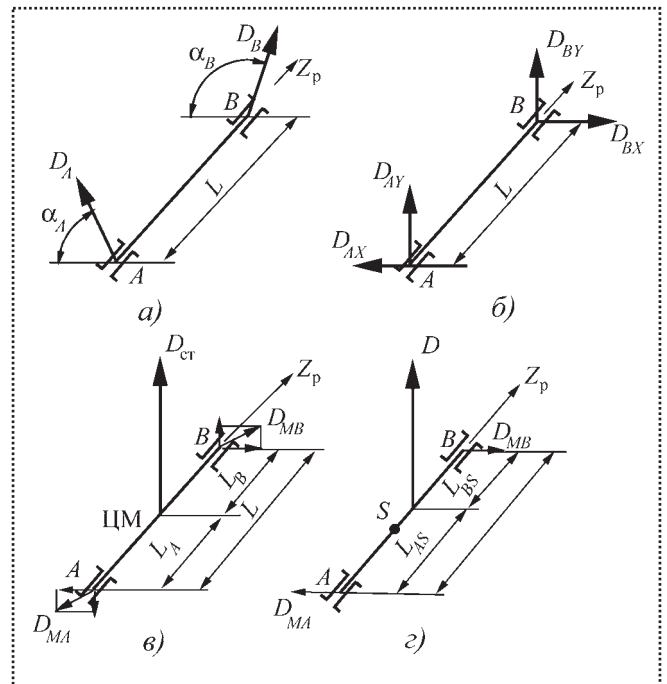


Рис. 5. Варианты неуравновешенности ротора

или их проекции на оси X и Y (см. рис. 5, б), то можно определить векторы

$$\bar{D}_{ct} = \bar{D}_A + \bar{D}_B; \quad (12)$$

$$\bar{D}_{MA} = \bar{D}_A - \bar{D}_{ct} \frac{L_B}{L} = \frac{1}{L}(\bar{D}_A L_A - \bar{D}_B L_B). \quad (13)$$

На рис. 5, в главный момент дисбалансов перпендикулярен (по правилу правой руки) плоскости, в которой расположены векторы $\bar{D}_{MA}, \bar{D}_{MB}$ и их модули:

$$D_{ct} = \sqrt{D_A^2 + D_B^2 + 2D_A D_B \cos \alpha} = D_A \sqrt{1 + \kappa_2^2 + 2\kappa_2 \cos \alpha}; \quad (14)$$

$$D_M \sqrt{\left(D_A \frac{L_A}{L}\right)^2 + \left(D_B \frac{L_B}{L}\right)^2 - 2D_A D_B \frac{L_A L_B}{L^2} \cos \alpha} = \frac{D_A}{1 + \kappa_1} \sqrt{\kappa_1^2 \kappa_2^2 + 1 - 2\kappa_1 \kappa_2 \cos \alpha} \quad (15)$$

или

$$\frac{D_{ct}}{D_M} = (1 + \kappa_1) \sqrt{\frac{1 + \kappa_2^2 + 2\kappa_2 \cos \alpha}{1 + \kappa_1^2 \kappa_2^2 - 2\kappa_1 \kappa_2 \cos \alpha}}, \quad (16)$$



где

$$\kappa_1 = \left| \frac{L_B}{L_A} \right|; \quad \kappa_2 = \left| \frac{D_B}{D_A} \right|;$$

$\alpha = \alpha_B - \alpha_A$ — угол между дисбалансами \bar{D}_A и \bar{D}_B .

4.2. Если при балансировке уменьшение главного вектора дисбалансов производят не по центру масс (см. рис. 5, в), а в другой точке S на оси Z_p , расстояния до которой от опор l_{AS} и l_{BS} , то значение D_M может быть получено минимальным при определенном $\kappa_3 = \left| \frac{l_{BS}}{l_{AS}} \right|$ (см. рис. 5, г). Это значение κ_3 можно

найти, приравняв нулю первую производную выражения (15):

$$\frac{dD_M}{d\kappa_1} = \frac{D_A}{1+\kappa_1} \frac{\kappa_1 \kappa_2^2 - \kappa_2 \cos \alpha}{\sqrt{\kappa_1^2 \kappa_2^2 + 1 - 2\kappa_1 \kappa_2 \cos \alpha}} - \frac{D_A}{(1+\kappa_1)^2} \sqrt{\kappa_1^2 \kappa_2^2 + 1 - 2\kappa_1 \kappa_2 \cos \alpha} = 0. \quad (17)$$

Откуда

$$\kappa_3 = \frac{\frac{1}{\kappa_2} + \cos \alpha}{\kappa_2 + \cos \alpha}.$$

Заметим, что при коррекции дисбалансов в трех плоскостях (отдельно D_{ct} и D_M) при найденном κ_3 (для D_{ct}) величины корректирующих масс будут минимальными.

$$4.2.1. \text{ Если } D_A = 0, \text{ то } D_{ct} = D_B, D_M = \frac{D_B L_B}{L} = \frac{D_B \kappa_1}{1 + \kappa_1}.$$

4.3. Рассмотрим формулу (11).

4.3.1. Когда угол φ между \bar{D}_{ct} и \bar{M}_D равен 0 или 180° , главный момент \bar{M}_D и главный вектор \bar{D}_{ct} коллинеарны, а дисбалансы в опорах

$$D_A^2 = D_{ct}^2 \left(\frac{L_B}{L} \right)^2 + \left(\frac{M_D}{L} \right)^2 = D_{ct}^2 \left(\frac{L_B}{L_A + L_A} \right)^2 + D_M^2; \quad (18)$$

$$D_B^2 = D_{ct}^2 \left(\frac{L_A}{L} \right)^2 + \left(\frac{M_D}{L} \right)^2 = D_{ct}^2 \left(\frac{L_A}{L_A + L_B} \right)^2 + D_M^2.$$

4.3.2. При $\varphi = 90$ и 270° , $\bar{M}_D \perp \bar{D}_{ct}$, т.е. когда \bar{D}_{ct} и \bar{D}_M коллинеарны, мы имеем случай квазистати-

ческой неуравновешенности, при которой дисбалансы \bar{D}_A и \bar{D}_B лежат в одной плоскости $Z_p A Y_p$:

$$\begin{aligned} D_A + D_{ct} \frac{L_B}{L} + \frac{M_D}{L} &= D_{ct} \frac{L_B}{L_A + L_B} + D_M; \\ D_B = D_{ct} \frac{L_A}{L} - \frac{M_D}{L} &= D_{ct} \frac{L_A}{L_A + L_B} - D_M. \end{aligned} \quad (19)$$

При этом возможны два случая.

4.3.2.1. $\alpha = 0$, тогда $D_{ct} = D_A(1 + \kappa_2)$, т.е. всегда $D_{ct} > D_A$, а

$$D_M = D_A \frac{1 - \kappa_1 \kappa_2}{1 + \kappa_1},$$

т.е. всегда $D_M < D_A$.

Если $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$ или $\kappa_1 = \frac{1}{\kappa_2}$, то, так как $D_M = 0$,

$$\frac{D_{ct}}{D_M} = \frac{(1 + \kappa_1)(1 + \kappa_2)}{1 - \kappa_1 \kappa_2} = \infty. \quad (20)$$

Следовательно, имеет место только статическая неуравновешенность.

4.3.2.2. $\alpha = 180^\circ$, тогда $D_{ct} = D_A(1 - \kappa_2)$, т.е. всегда $D_{ct} < D_A$. Если $\kappa_2 = 1$, то $D_{ct} = 0$, следовательно, имеет место только моментная неуравновешенность.

При этом $D_M = D_A \frac{1 + \kappa_1 \kappa_2}{1 + \kappa_1}$, причем $D_M > D_A$.

Если $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$, то $D_M = D_A$ и

$$\frac{D_{ct}}{D_M} = \frac{(1 + \kappa_1) - (1 - \kappa_2)}{1 + \kappa_1 \kappa_2} = 0. \quad (21)$$

4.3.3. Для случая, когда $\alpha = 90$ или 270° , $\cos \alpha = 0$, $D_{ct} = D_A \sqrt{1 + \kappa_2^2}$; $D_M = \frac{D_A}{1 + \kappa_1} \sqrt{1 + \kappa_1^2 \kappa_2^2}$, т.е. D_{ct}

и $D_M \neq 0$.

Следовательно,

$$\frac{D_{ct}}{D_M} = (1 + \kappa_1) \sqrt{\frac{1 + \kappa_2^2}{1 + \kappa_1^2 \kappa_2^2}} > 0.$$

4.4. Связь между углами β (или φ) и α .

4.4.1. Из формул (7) и (14) и рис. 6 следует, что на опору A приходится составляющая главного вектора

$$D_{ct A} = D_{ct} \frac{L_B}{L} = D_{ct} \frac{\kappa_1}{1 + \kappa_1}$$

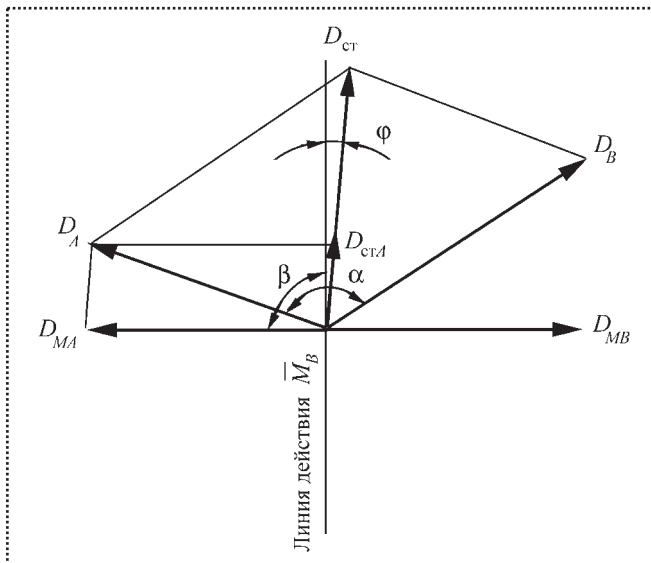


Рис. 6. Расположение векторов дисбаланса главного вектора и дисбаланса от момента

или

$$D_{ст\ A} = D_A \frac{\kappa_1}{1 + \kappa_1} \sqrt{1 + \kappa_2^2 + 2\kappa_2 \cos \alpha}.$$

На эту же опору действует дисбаланс от момента [формула (15)]:

$$D_M = \frac{D_A}{1 + \kappa_1} \sqrt{\kappa_1^2 \kappa_2^2 + 1 - 2\kappa_1 \kappa_2 \cos \alpha}.$$

Из рис. 6

$$D_A = \sqrt{D_{ст\ A}^2 + D_{MA}^2 - 2D_{ст\ A} D_{MA} \cos \beta}.$$

Следовательно,

$$\cos \beta = \frac{D_{ст\ A}^2 + D_{MA}^2 - D_A^2}{2D_{ст\ A} D_{MA}}.$$

Подставив приведенные выше значения, после преобразований получим

$$\cos \beta = \frac{\kappa_1 \kappa_2^2 - 1 + (\kappa_1 - 1) \kappa_2 \cos \alpha}{\sqrt{(1 + \kappa_2^2 + 2\kappa_2 \cos \alpha)(1 + \kappa_1^2 \kappa_2^2 - 2\kappa_1 \kappa_2 \cos \alpha)}}. \quad (22)$$

4.4.2. При квазистатической неуровновешенности, когда $\alpha = 0$

$$\cos \beta = \frac{\kappa_1 \kappa_2^2 - 1 + \kappa_1 \kappa_2 - \kappa_2}{1 - \kappa_1 \kappa_2 + \kappa_2 - \kappa_1 \kappa_2^2} = -1, \quad (23)$$

т.е. $\beta = 180^\circ$, а $\varphi = 90$ или 270° . В этом случае $\overline{D_{MA}} \parallel \overline{D_{ст}}$, а $\overline{M_D} \perp \overline{D_{ст}}$. Для $\alpha = 180^\circ$ получаются те же результаты.

4.4.3. Если же $\alpha = 90$ или 270° , то

$$\cos \beta = \frac{\kappa_1 \kappa_2^2 - 1}{\sqrt{(1 + \kappa_2^2)(1 - \kappa_1^2 \kappa_2^2)}}, \quad (24)$$

что при $\kappa_1 = \kappa_2 = 1$ и при $\kappa_1 = \frac{1}{\kappa_2}$ дает 0, т.е. при этих условиях $\beta = 90$ или 270° , а $\varphi = 0^\circ$ или $\overline{M_D} \parallel \overline{D_{ст}}$, а $\overline{D_M} \perp \overline{D_{ст}}$. Во всех остальных случаях $\cos \beta \neq 0$.

4.4.4. Если $\beta = 0$ или 180° , а $\cos \beta = 1$, то

$$\cos \alpha = \pm \frac{(\kappa_1 + 1)^2}{(\kappa_1 + 1)^2} = \pm 1, \quad (25)$$

т.е. $\alpha = 90$ или 270° .

Если $\beta = 90$ или 270° , а $\cos \beta = 0$, то

$$\cos \alpha = \frac{1 - \kappa_1 \kappa_2^2}{\kappa_2 (\kappa_1 - 1)}, \quad (26)$$

что при $\kappa_1 \kappa_2^2 = 1$ дает $\alpha = 180^\circ$, если $\kappa_1 < 1$.

Раздел 5. Особенности моментной неуровновешенности

5.1. Рассмотрим особенности абсолютно твердого ротора, связанные с его моментной неуровновешенностью.

Для ротора произвольной формы при угле γ между главной центральной осью инерции OZ_0 и осью ротора OZ_p (см. рис. 4) суммарный момент неуровновешенных сил определяется формулой

$$M_0 = \omega^2 \frac{\sin 2\gamma}{2} (J_{X_0} - J_{Z_0}), \quad (27)$$

где J_{X_0} и J_{Z_0} – главные моменты инерции ротора относительно ортогональных главных центральных осей инерции X_0 и Z_0 . Откуда главный момент дисбалансов ротора

$$M_D = \frac{\sin 2\gamma}{2} (J_{X_0} - J_{Z_0}). \quad (28)$$

Направление главного момента дисбалансов ротора $\overline{M_D}$ определяется знаком разности $J_{X_0} - J_{Z_0}$. Если $J_{X_0} > J_{Z_0}$ ("длинный" ротор), вектор $\overline{M_D}$ будет



ориентирован вдоль положительного направления оси OY_0 ; при $J_{x_0} < J_{z_0}$ ("короткий" ротор или диск) вектор \overline{M}_D будет направлен в противоположном направлении.

5.2. Для ротора в виде однородного симметричного цилиндра длины l_p , радиуса R и массы m_p

$$J_{x_0} = m_p \frac{3R^2 l_p^2}{12}; \quad J_{z_0} = m_p \frac{R^2}{2}; \quad (29)$$

$$\overline{M}_D = \frac{\sin 2\gamma}{2} m_p \left(\frac{l_p^2 - 3R^2}{12} \right). \quad (30)$$

Следовательно, если $l_p = R\sqrt{3}$, то независимо от угловой скорости вращения и независимо от угла γ между главной центральной осью инерции и осью ротора, главный момент дисбалансов \overline{M}_D однородного цилиндрического ротора будет равен нулю.

Примечание. Главный момент дисбалансов \overline{M}_D однородного цилиндрического ротора по модулю равен его центробежному моменту инерции относительно оси ротора OZ_p и ей перпендикулярной главной центральной оси инерции ротора OY_0 . Момент \overline{M}_D является моментом "внутренним", порождаемым неуравновешенными массами ротора при его вращении.

5.2.1. Если предположить, что угол $\gamma \leq 10^\circ$, то можно принять (с наибольшей погрешностью $\approx 1,5\%$), что $\sin 2\gamma/2 \approx \gamma$. В этом случае формула (30) для модуля главного момента дисбалансов однородного симметричного цилиндра примет вид

$$M_D = \frac{\pi\rho\gamma}{12} R^2 l_p (l_p^2 - 3R^2) = \frac{\pi\rho\gamma}{12} R^5 \frac{l_p}{R} \left(\frac{l_p^2}{R^2} - 3 \right), \quad (31)$$

где ρ – плотность материала ротора.

Откуда

$$\frac{12M_D}{\pi\rho\gamma R^5} = \frac{l_p}{R} \left(\frac{l_p^2}{R^2} - 3 \right) = A$$

и при $l_p = R\sqrt{3} A = 0$.

Производная

$$\frac{dA}{d\left(\frac{l_p}{R}\right)} = 3 \left(\frac{l_p^2}{R^2} - 1 \right) = 0,$$

когда $l_p = R$, т.е. A будет иметь минимальное значение.

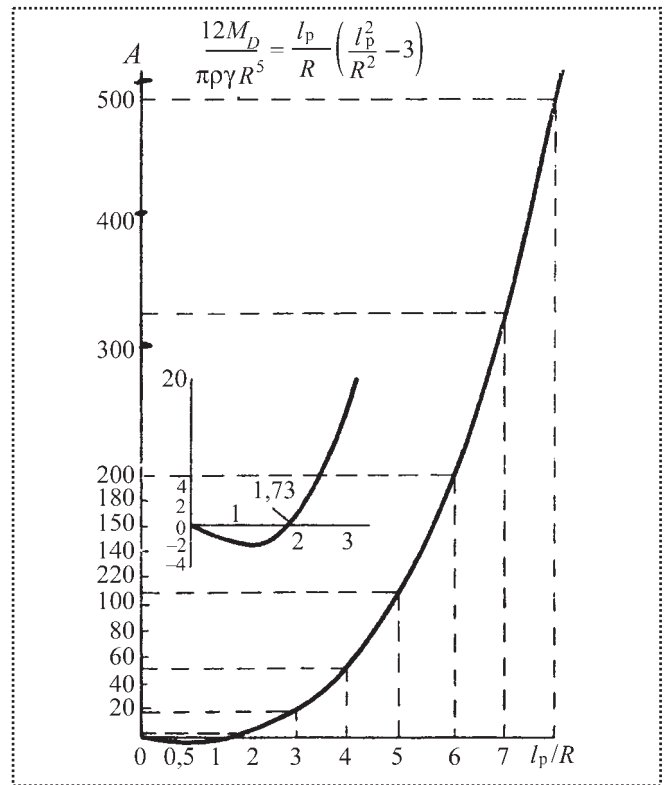


Рис. 7. Зависимость величины A от отношения $\frac{l_p}{R}$

На рис. 7 показан примерный ход кривой

$$A = M_D \frac{12}{\pi\rho\gamma R^5},$$

т.е. главного момента дисбалансов ротора при изменении $\frac{l_p}{R}$.

5.2.2. Пользуясь формулами (30), (7), (8), можно сравнить воздействие на опоры моментной и статической неуравновешенностей.

При одной только моментной неуравновешенности у симметричного межопорного ротора с $L_A = 0,5L$ угол

$$\gamma = \frac{e_m}{0,5L},$$

где e_m – расстояние от главной центральной оси инерции Z_0 до оси ротора Z_p на середине опоры A или B .

При одной только статической неуравновешенности у того же ротора ось Z_0 будет смещена на $e_{ст}$ параллельно оси ротора Z_p .

Нагрузки, создаваемые моментной (при малом γ) и статической неуравновешенностями на каждой

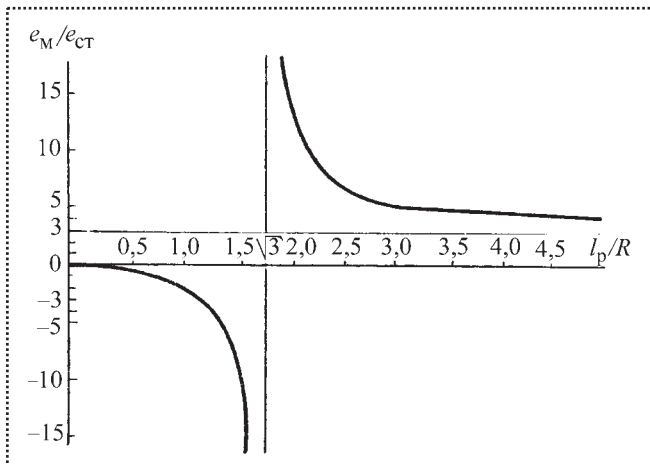


Рис. 8. Зависимость отношения $\frac{e_M}{e_{ст}}$ от $\frac{l_p}{R}$ при $L \approx L_p, \gamma < 10^\circ$

из двух опор ротора при его вращении с угловой скоростью ω , можно выразить так:

$$D_{MA,B}\omega^2 = \frac{M_D\omega^2}{L} = \frac{m_p R^2 e_M \omega^2}{6L^2} \left(\frac{l_p^2}{R^2} - 3 \right);$$

$$D_{ст A,B}\omega^2 = \frac{m_p e_{ст} \omega^2}{2}.$$

При равенстве этих нагрузок

$$\frac{e_M}{e_{ст}} = \frac{3L^2}{\left(\frac{l_p^2}{R^2} - 3 \right) R^2}. \quad (32)$$

Рис. 8 показывает изменение отношения $\frac{e_M}{e_{ст}}$ в зависимости от $\frac{l_p}{R}$ при равенстве нагрузок в опорах от статической и моментной неуравновешенностей, если принять $L \approx l_p$.

5.2.3. Для посаженного без перекоса диска (например, абразивный круг) формула (31) будет выглядеть так:

$$M_D = \frac{\pi p \gamma}{4} (R^2 - r^2) l_p \left(\frac{l_p^2}{3} - R^2 - r^2 \right),$$

где $2r$ – диаметр отверстия диска.

Следовательно, при $l_p = \sqrt{3(R^2 + r^2)}$, $M_D = 0$; M_D имеет минимум при $l_p = \sqrt{R^2 + r^2}$. Характер же кривых на рис. 8 остается без изменения (изменится лишь масштаб).

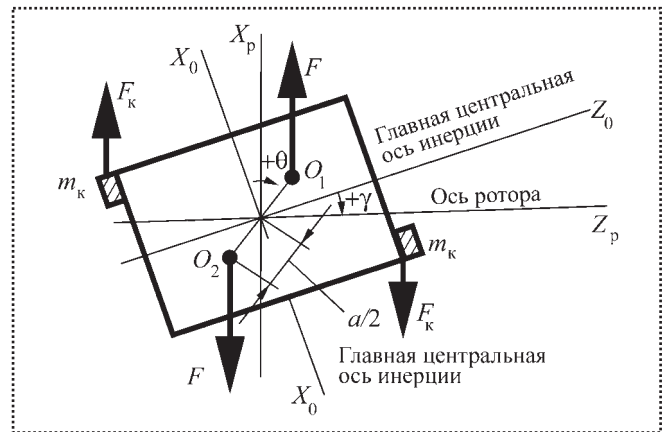


Рис. 9. Схема сил и моментов, действующих на "длинный" ротор:

F – сила, действующая на ротор; F_k – силы, возбуждаемые корректирующими массами m_k ; M_k – "внешний" момент от сил F_k ; a – расстояние между точками O_1 и O_2 ; O_1 и O_2 – центры масс частей цилиндра, лежащих по обе стороны сечения плоскостью, содержащей ось ротора

5.3. Для абсолютно твердого ротора углы γ и θ разные (рис. 9), но связаны между собой. Из (28) и формулы

$$M_0 = F \sin \theta = \frac{m_p}{2} \omega^2 \frac{a}{2} \cos \theta \sin \theta = \frac{m_p}{8} \omega^2 a^2 \sin 2\theta \quad (33)$$

получаем

$$\sin 2\theta = \frac{4}{m_p a^2} (J_{X_0} - J_{Z_0}) \sin 2\gamma. \quad (34)$$

Следовательно, увеличение угла γ будет сопровождаться также и увеличением угла θ . Знак разности моментов инерции $J_{X_0} - J_{Z_0}$ будет определять знак угла θ при данном угле γ (на рис. 9 и 10 обозначены различные направления отсчета этих углов).

5.3.1. На рис. 9 изображен "длинный" ротор ($J_{X_0} > J_{Z_0}$) и обозначены его оси. У таких роторов момент M_0 сил F стремится не уменьшать, а увеличивать угол γ , следовательно, увеличивать и угол θ .

Допустим, что для уравнивания момента M_0 к ротору приложен "внешний" момент M_k , например, от сил F_k , возбуждаемых корректирующими массами m_k . Существенно, что этот момент M_k будет уменьшать углы θ и γ и поэтому уравнивание момента будет иметь место при некоторых новых значениях этих углов, меньших, чем первоначальные значения.

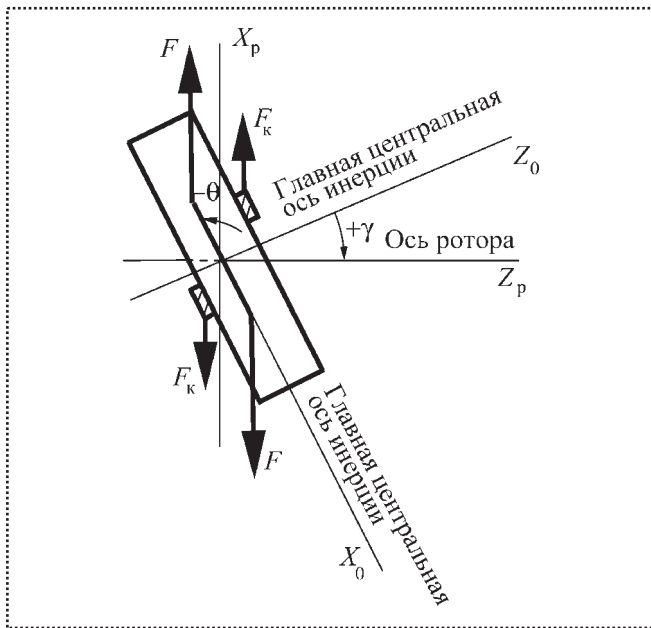


Рис. 10. Схема сил и моментов, действующих на "короткий" ротор

Новым значениям углов θ и γ будет соответствовать новое значение момента, равное $M_0 - \Delta M_0$. Следовательно, для уравнивания момента M_0 (любого происхождения) к нему необходимо приложить корректирующий момент $M_k = M_0 - \Delta M_0$.

Величина M_0 зависит от формы и размеров ротора, от распределения массы в его объеме, а также и от упругих свойств ротора и от зазоров в его опорах. Для данного ротора ΔM_0 будет определяться только изменением угла θ и расстоянием a (см. рис. 9), вызванным действием внешнего момента:

$$\Delta M_0 = \frac{\partial M_0}{\partial \theta} \Delta \theta + \frac{\partial M_0}{\partial a} \Delta a.$$

Величину ΔM_0 можно представить в виде функции только от угла θ , если известна зависимость расстояния a от этого угла. Эта зависимость определяется конфигурацией ротора и, в частности, соотношением между моментами инерции J_{X_0} и J_{Z_0} .

5.3.2. У "коротких" роторов (см. рис. 10) $J_{X_0} < J_{Z_0}$ момент M_0 , создаваемый силами F , стремится уменьшить углы θ и γ , следовательно, уравнивающий его корректирующий момент M_k , создаваемый силами F_k , будет увеличивать эти

углы. Таким образом, приложение момента M_k должно привести к увеличению момента M_0 , который необходимо уравновесить на величину ΔM_0 . Следовательно, процесс уравнивания моментов закончится, когда будет выполнено условие

$$M_k = M_0 + \Delta M_0.$$

Теоретически возможен случай, когда $M_k = \Delta M_0$, т.е., когда корректирующий момент M_k будет полностью компенсироваться вызванным им же увеличением момента M_0 . В этом случае ротор будет совершенно "нечувствителен" к моменту M_k , присоединение корректирующих масс m_k и действие момента M_k не вызовут изменения неуравновешенности ротора, т.е. величина M_0 останется постоянной. Очевидно, что такая "нечувствительность" ротора будет определяться тем, как сильно изменяется M_0 в зависимости от угла θ и расстояния a . Если для данного ротора величина a представлена в виде функции от угла θ , то $\Delta M_0 = \frac{dM_0}{d\theta} \Delta \theta$ и "чувстви-

тельность" ротора может быть оценена по величине $dM_0/d\theta$. Можно показать, что эта производная зависит от разности $J_{X_0} - J_{Z_0}$.

5.3.3. Различие в поведении "длинных" и "коротких" роторов при балансировке обусловлено тем, что у первых осью с наибольшим значением момента инерции является ось OX_0 , тогда как у "коротких" роторов — ось OZ_0 . Моментная неуравновешенность вызвана неуравновешенными силами, а действие этих сил всегда направлено в сторону уменьшения угла между осью вращения и той главной центральной осью инерции, которой соответствует наибольший момент инерции. Поэтому у "длинных" роторов появление небольшого угла γ приводит к появлению дополнительного момента ΔM_0 , направленного в сторону увеличения угла γ , а следовательно, увеличения угла θ и первоначального момента M_0 . У "коротких" роторов, наоборот, появление угла γ приводит к возбуждению дополнительного момента ΔM_0 , стремящегося уменьшить угол γ и, следовательно, уменьшить первоначальный неуравновешенный момент M_0 .

(Продолжение следует.)

Н.В. Земляков, канд. техн. наук
(Орловский государственный технический университет)

Стопорение болта в глухом отверстии корпуса

Рассмотрены новые устройства стопорных болтов, обеспечивающих стопорение в глухих отверстиях корпуса при сборке и надежно работающие в условиях сильной и продолжительной вибрации.

New devices of the lock bolts providing latching are considered in indistinct apertures of the case at assembly and reliably working in conditions strong and long vibration.

Ключевые слова: болт, продолжительная вибрация.
Key words: bolt, long vibration.

Стопорение болтов, при сборке узлов и машин, так же как и стопорение гаек, является старейшей, классической задачей машино- и приборостроения.

Диапазон использования болтов как элементов резьбового крепления огромен, они используются в технике транспорта, в строительных конструкциях, в приборах и машинах технологических линий в бытовых машинах и приборах. И в большинстве случаев при сборке узлов машин с помощью болтов ставится задача обеспечения надежного и защищенного от самовывинчивания резьбового соединения. Такие требования к резьбовым соединениям обязательны, если они устанавливаются на различных машинах, связанных с транспортированием (перевозкой) человека и особо ценных грузов.

В первую очередь к таким машинам относятся авиационная техника, пассажирские и военные самолеты и вертолеты, пилотируемые космические корабли и космические станции, а также техника водного транспорта, такие как пассажирские и военные корабли, катера, яхты, подводные лодки. А с учетом наибольшей массовости единиц транспорта такими являются: автомобильный транспорт, железнодорожный транспорт сельскохозяйственные машины. Во всех указанных машинах и конструкциях используется огромная масса деталей и узлов, которые закреплены с помощью болтов, в том числе установленных и в глухих резьбовых отверстиях.

Анализируя известные конструкции, обеспечивающие стопорение болтов при сборке, было выявлено несколько основных технологических приемов – способов, которые обеспечивают из стопорение.

Во-первых, стопорение головки болта или винта путем введения краски или лака под головку и частично на резьбу. Но после высыхания краски или лака такое болтовое резьбовое соединение становится практически неремонтопригодным.

Во-вторых, широко практикуют способ установки под головку болта пружинных шайб разных конструкций. Такой способ лучше, так как он обеспечивает ремонтпригодность.

В-третьих, известен способ, при котором на резьбовом стержне болта устанавливаются резиновые или полиамидные кольца или вставки типа шпонки. Этот способ, так же как и второй, обеспечивает ремонтпригодность, но надежность стопорения ими низка.

Однако все вышеизложенные способы не прижились в практике крепления тяжелых агрегатов к станине, которая испытывает высокоамплитудные и долговременные нагрузки. Например, при креплении крепежных лап агрегата мотор-компрессора болтами в глухих резьбовых отверстиях, выполненных в шасси электровоза. Тогда для повышения надежности крепления края головок болтов после их затяжки дополнительно приваривают к лапам агрегата мотор-компрессора, фактически создавая неремонтопригодное "резьбовое" соединение. Такая ситуация наблюдалась автором лет пятнадцать назад в Орловском локомотивном депо. А чтобы в аварийных условиях демонтировать такие болты, в электровозе возили сварочный аппарат для срезки болтов.

Существование таких ситуаций побудило автора к созданию болта для глухого отверстия, способного обеспечить: *во-первых*, ремонтпригодность, а *во-вторых*, достаточную надежность при работе болта в условиях сильной и долговременной вибрации.

Был получен патент России на изобретение "Резьбовой элемент конструкции Н.В. Землякова".

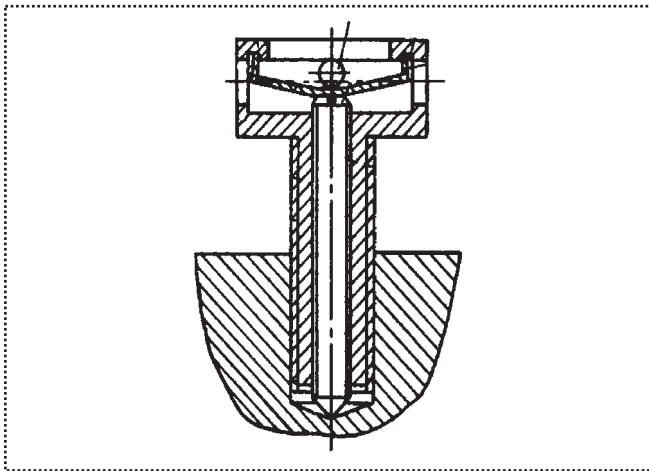


Рис. 2. Вариант конструкции болта со стопорением на случай больших инерционных нагрузок

На рис. 1, см. 4-ю стр. обложки, изображен болт, ввинченный в глухое отверстие. В конструкции такого болта в резьбовом стержне выполнено сквозное отверстие с дополнительной резьбой. В это отверстие по дополнительной резьбе ввинчен установочный винт с упором в днище глухого отверстия. Головка же болта выполнена с цилиндрической полостью и бортиком.

После затяжки установочного винта отверткой через шлиц или накидной головкой (если имеются грани на головной части установочного винта) между торцевой частью установочного винта и бортиком цилиндрического отверстия устанавливается пружинная пластина, опирающаяся средней частью на торец винта, а концами – в бортик отверстия. Такая пружинная подпорка снижает возможность самопроизвольного проворота винта с последующим ослаблением натяга в витках резьбы.

Во втором варианте этого изобретения (рис. 2) предусмотрен вариант повышенной надежности стопорения на случай больших инерционных нагрузок, не позволяющий создать прогиб пружины. В этом варианте между бортиком отверстия и средней частью пружины вставлен стержень, диаметр которого подобран селективным методом.

Селективный метод подбора прокладок был использован в следующей конструкции болта для глухого отверстия. "Стопорящийся болт конструкции Н.В. Землякова" (рис. 3, см. 4-ю стр. обложки).

Для выборки зазора между установочным винтом и бортиками прямоугольного в сечении паза использованы плоские пластины. Эта конструкция

нашла применение на гиганте автопрома СССР – "Камаз", где автору 10.07.1989 г. был вручен нагрудный знак "Изобретатель СССР". А на ВДНХ СССР экспонаты моделей этих болтов были отмечены серебряной медалью.

Однако и это техническое решение имеет определенные недостатки, снижающие как монтаж сборочных работ, так и демонтаж при ремонте. Для устранения этих очевидных недостатков конструкция болта для глухого отверстия вновь была пересмотрена по алгоритму АРИЗ и в результате было создано новое устройство (рис. 4 и рис. 5, см. 4-ю стр. обложки) – «Болт для крепления в глухом отверстии».

В новом устройстве стопорного болта для крепления в глухом отверстии была использована идея из изобретения "Способ Н.В. Землякова стопорения гайки на резьбовом элементе", а именно использование фиксирующего стержня, выполненного из пластически деформируемого материала (алюминий, медь, латунь, отожженная сталь и т.п.). Так как перед стопорением, т.е. перед ввинчиванием резьбового стержня болта до упора в глухое днище резьбового отверстия, в соосные отверстия (одно выполнено поперек установочного винта и несколько пазов имеется в головке болта) устанавливается фиксирующий стержень, выполненный, например, из алюминиевой проволоки. Тогда при стопорении, т.е. при дальнейшем ввинчивании установочного винта в днище резьбового отверстия, соосные отверстия начнут смещаться относительно друг друга, и алюминиевая проволока начнет изгибаться и пластически деформироваться.

В этом случае процесс стопорения, т.е. увеличение натяга в витках резьбового стержня болта обеспечивается не дискретным методом, как в устройстве, где выбор зазора осуществляется селективным подбором пластин, а интегральным по времени методом. В этом случае создаваемый в витках основной резьбы натяг сопровождается параллельным во времени процессом пластической деформации фиксирующего стержня, вследствие чего созданный в витках основной резьбы болта натяг надежно обеспечен и сохранен "механической памятью", созданной при деформации кристаллической решетки металлического фиксирующего стержня.



Библиографический список

1. Авторское свидетельство СССР № 1164477. Резьбовой элемент конструкции Н.В. Землякова / Н.В. Земляков. Б.И. № 24, 1985.
2. Патент России № 1231293. Стопорящийся болт конструкции Н.В. Землякова / Н.В. Земляков. Б.И. № 18, 1986.
3. Патент России № 2154203. Болт для крепления в глухом отверстии / Н.В. Земляков, Д.О. Земляков. Б.И. № 21, 1995.
4. Земляков Н.В. Разработка высоконадежных резьбовых устройств и опыт их внедрения в промышленность // Материалы областной научно-технической конференции "Совершенство-

вание конструкций и технологий производства приборов, машин, механизмов". Орел. 1990.

5. Земляков Н.В. Новые стопорные резьбовые соединения для оборудования пищевой промышленности // Материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию заслуженного деятеля науки и техники РСФСР, проф. Попова Владимира Ильича. Часть II. Россия, Воронеж, 22–24 сентября 2004 г.

6. Земляков Н.В. Новые технологии стопорения резьбовых соединений (гаек и болтов) // 2006. № 2 (528) "Известия Орел-ГТУ". Серия Машиностроение. Приборостроение". 2006. С. 129.

СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

Свойства пластмасс для зубчатых колес в механизмах приборов*

1. Механические свойства пластмасс при 20 °С

Материал	Напряжение при растяжении, МПа		Модуль упругости при растяжении, E , МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	
	σ_T	$\sigma_{вр}$			без надреза	с надрезом
ПЭВП	15...25	—	600...1400	100...1000	Не разрушается	5...20
ПЭ-ВМ	20	—	700	450	То же	Не разрушается
ПП	26...38	—	1100...1600	700...800	—"–	3...15
ПП + 30 % СВ	—	70	3500...4000	15	15	6
ПА 66 высушенный	80...85	—	2600...3000	30...60	Не разрушается	2...3
ПА 66 равновесной влажности	55...60	—	1700...2000	120...220	То же	10...20
ПА 66 + 30 % равновесной влажности	—	140	8000...100 000	5	45	8
ПА 6 высушенный	75...85	—	2500...3200	50...130	Не разрушается	3...10
ПА 6 нормальной влажности	30...50	—	900...1400	160...250	То же	20...35
ПА 6 + 30 % СВ равновесной влажности	—	100	6000...8000	4	60	13
ПА 610 равновесной влажности	45...55	—	1300...1600	80...150	Не разрушается	13...15
ПА 11 высушенный	47	—	1300...1400	280	То же	10...20
ПА 11 равновесной влажности	42	—	1100...1200	230	—"–	30...40
ПА 12 высушенный	47...58	—	1500...1800	100...350	—"–	5,11
ПА 12 равновесной влажности	38...46	—	1200...1350	120...350	—"–	10...15
ПА аморфизированный	85	—	2900	70	—"–	10...15
ПОМ	70	—	2800...3500	10...14	—"–	3...5
ПОМ + 30 % СВ	—	95...100	6000...8000	5...6	30	2...5
ПК	60...65	—	2000...2200	80...120	Не разрушается	20...30

* Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов. Расчет и конструирование. Справочное и научное издание / под общ. ред. В.Е. Старжинского и Е.В. Шалобаева. С.-Петербург–Гомель, 1998. 583 с.



Материал	Напряжение при растяжении, МПа		Модуль упругости при растяжении, E, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %	Ударная вязкость по Шарпи, кДж/м ²	
	σ_T	$\sigma_{вр}$			без надреза	с надрезом
ПК + 30 % СВ	—	90	6000...7000	4	40	10...15
ПЭТФ	55...74	—	2800...3100	50...150	Не разрушается	4
ПЭТФ + 30 % СВ	—	150	12 000	2...3	25...30	8
ПБТ	50...60	—	2600...2800	100...200	Не разрушается	4...5
ПБТ + 30 % СВ	—	110...115	11 000	2...3	40...45	10
ПФО/ПС	50...70	—	2200...2500	60	Не разрушается	15
ПФО/ПС + 30 % СВ	120	—	8500...9500	4...6	30	8
ПСО	72...93	—	2440	50...100	Не разрушается	3...10
ПЭС	80...90	—	2750	40...60	То же	4...6
ПИ	—	75...95	3200	7...9	—	—
ПФС	—	76	3400	3	—	—

2. Свойства суперконструкционных пластиков

Показатель	Полиэфирэфиркетон	Полиэфиримид	Полиэфирсульфон	Полифениленсульфид	Полисульфон	Полифениленэфир	Жидкокристаллический "Вектра"	Полиамидимид
Плотность, кг/м ³	$\frac{1320}{1490}$	$\frac{1270}{1510}$	$\frac{1370}{1600}$	$\frac{1370}{1560}$	$\frac{1240}{1450}$	$\frac{1060...1100}{1210...1360}$	$\frac{1400...1900}{1700...1800^*}$	1420
Предел прочности при растяжении, МПа	$\frac{102}{175}$	$\frac{106}{200}$	$\frac{84}{133}$	$\frac{75}{140}$	$\frac{50}{126}$	$\frac{50...67}{101...125}$	$\frac{140...245}{112}$	195
Модуль упругости при изгибе, ГПа	$\frac{3,7}{7,7}$	$\frac{3,4}{8,8}$	$\frac{2,6}{8,4}$	$\frac{4,2}{11,1}$	$\frac{2,8}{8,4}$	$\frac{2,1...2,5}{5,2...7,6}$	$\frac{1,0...4,0}{13...15}$	5,1
Ударная вязкость по Изоду, Дж/м:								
с надрезом	$\frac{85}{115}$	$\frac{50}{90}$	$\frac{90}{80}$	$\frac{160...220}{15}$	$\frac{65}{97}$	$\frac{250...500}{125}$	$\frac{60}{100}$	150
без надреза	$\frac{-}{930}$	$\frac{1400}{870}$	$\frac{-}{850}$	$\frac{430...500}{75}$	$\frac{3000}{750}$	—	—	—
Термический коэффициент линейного расширения, $\alpha \cdot 10^5$, °С ⁻¹	—	$\frac{1,7}{0,6}$	$\frac{1,7}{1,0}$	$\frac{1,7}{0,6}$	$\frac{1,7}{0,8}$	$\frac{1,8...2,1}{0,8...1,1}$	$\frac{-}{0,5}$	0,95
Деформационная теплостойкость при 1,8 МПа, °С	$\frac{180}{316}$	$\frac{200}{210}$	$\frac{205}{213}$	$\frac{140}{260}$	$\frac{170}{185}$	$\frac{90...150}{132...150}$	$\frac{180...240}{310}$	278
Водопоглощение (за 24 ч), %	$\frac{0,15}{0,1}$	$\frac{0,25}{0,18}$	$\frac{0,25}{0,20}$	$\frac{0,05}{0,04}$	$\frac{0,20}{0,20}$	$\frac{0,07}{0,07}$	$\frac{0,02...0,04}{0,01}$	0,33
Примечание. Под чертой — показатели для стеклонаполненных материалов.								



3. Физико-механические характеристики смесей на основе термопластов

Показатель	Полиамиды			Полиацетали		Поликарбонат					ПБТ		Поли-фенилен-оксид
	Дуретан BC 300	Грилон A 28 NX	Цитель ST 610	Дельрин 100 ST	Цейлон 6400	Циколой ВН1	Бай-бленд МН-6500	Юпилон GP1	Ксеной 1100	Макро-бленд PR	Валокс 815	Покан VPK	Норил SF16FN21
Плотность, кг/м ³	1100	1120	1080	1340	1390	1070	—	1140	1220	1230	1430	—	1250
Предел прочности при растяжении, МПа	50...60	40	41,0	68,9	52,7	50	57,06	58...65	55	55	84	65	102
Модуль упругости при растяжении, МПа	2...3	2,0*	—	2,88*	2,04*	2,42	2,5*	2,4*	2,1*	1,8	4,5*	1,7	4,8*
Относительное удлинение при разрыве, %	50...100	50	210	40...100	75	—	—	80...120	100	120	—	100	4...6
Деформационная теплостойкость, при 1,85 МПа, °С	115...200	60	71	90	84	112	107	105	127	122	160	135	138
Ударная вязкость по Изоду, Дж/м: при 20 °С	250	40...42**	1089	108,7	79,8	370	400	500	800 (40**)	747	—	40**	98
при -20 °С	90	—	130	—	—	—	—	—	—	106	—	—	—
Температура плавления, °С	—	224	255	175	—	—	—	—	—	—	—	—	—

* Модуль упругости при изгибе.
** Ударная вязкость по Шарпи с острым надрезом.

4. Усадка пластмасс

Материал	Ограниченная усадка, %	Свободная усадка при толщине стенки, %		Материал	Ограниченная усадка, %	Свободная усадка при толщине стенки, %	
		менее 4 мм	более 4 мм			менее 4 мм	более 4 мм
ПА 6	1,2	1,8	2,0	ПП	1,0	1,8	2,0
ПА 6А	3,0	—	4,0	ПА 6 + 30 % СВ	0,2	0,8	0,8
ПА 66	1,2	1,8	2,2	ПА 66 + 30 % СВ	0,2	0,8	0,8
ПА 610, ПА 612	0,8	1,4	1,6	ПУ	1,0	1,0	1,0
ПА 11	1,0	1,8	2,0	ПА 11 + 30 % СВ	0,4	1,0	1,0
ПА 12	1,0	1,8	2,0	ПА 12 + 30 % СВ	0,4	1,6	1,0
ПК	0,6	0,8	0,8	ПОМ + 30 % СВ	0,2	0,8	0,8
ПОМ	1,5	2,2	2,5	ПЭТФ + 30 % СВ	0,2	0,8	0,8
ПЭТФ	1,2	1,8	2,0	ПБТ + 30 % СВ	0,2	0,8	0,8
ПБТ	1,2	1,8	2,0	ПП + 30 % СВ	0,4	1,0	0,1
ПЭВП	1,5	—	3,0	ПК + 30 % СВ	0,2	0,4	0,4

**5. Теплофизические свойства пластмасс**

Марка пластмассы	Удельная теплоемкость C_p , кДж/(кг·К)	Теплопроводность, λ , Вт/(м·К)	Термический коэффициент линейного расширения $\alpha \cdot 10^3$, °C ⁻¹	Температурный интервал, °C		Температура хрупкости, °C
				кратковременный	длительный	
ПЭВП	2,0...2,3	0,38...0,48	14	95	75	-60
ПП	1,7	0,22	18	130	95	-10
ПА 66	1,7	0,2	7...10	140...160	80...90	-20 до 0
ПА 66 + 30 % СВ	1,4...1,5	0,23	3...4,5	220	90...120	-20 до 0
ПА 6	1,67...2,1	0,21	7...12	120...150	80...90	-20 до 0
ПА 6 + 30 % СВ	1,26...1,7	0,29	3...4,5	170...200	80...120	-20 до 0
ПА 610	1,7	0,3	7	130...150	80...90	-20 до 0
ПА 11	1,4	0,27	11...12	110...140	70...80	-40
ПА 12	1,2	0,2	8...10	110...140	70...80	-40
ПА аморфизированный	1,47	0,21	6	—	—	—
ПОМ	1,47...1,5	0,29	10...14	140	85...95	-50
ПОМ + 30 % СВ	1,22	0,40	3	150	95...120	-50

**Подписные индексы журнала
"Сборка в машиностроении, приборостроении"****79748** – по каталогу агентства "Роспечать",**84967** – по каталогу "Пресса России",**60257** – по каталогу "Почта России"ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский пер., 4Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".Адрес электронной почты издательства: **E-mail: mashpubl@mashin.ru**; редакции журнала: **sborka@mashin.ru; www.mashin.ru**

Телефон редакции журнала: (495) 268-38-42; тел./факс (495) 268-85-26; факс 269-48-97.

Технический редактор *Тупталов С.Ю.* Корректоры *Сажина Л.И., Солюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 09.07.08 г. Подписано в печать 02.09.08 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,03. Заказ 885. Свободная цена.

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

Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15.