ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

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

12 2008 (101)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Семенов А.Н., Наумова С.А. Влияние закономерностей базирования деталей на функциональное качество и надежность машин . . . 3

Давыдова Н.С., Симаков А.Л. Анализ поисковых траекторий перемещения в средствах адаптации деталей для автоматизированной сборки . . . 9

Чумаков Р.Е. Исследование силовых показателей при монтаже резьбообразующих винтов в листовой материал . . . 14

Скуратов Д.Л., Сидоров С.Ю. Прогрессивные конструкции и способ сборки шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью . . . 18

Вартанов М.В., Власов А.И. Влияние толщины клеевой прослойки на прочность соединений кузовных панелей автомобилей . . . 21

Технологическая оснастка для сборки

Воркуев Д.С. Предельные режимы работы механизмов свободного хода храпового типа с учетом ударов . . . 24

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Трусов В.И., Кузинова Т.М., Гармашова И.В. Новые технологии "вре́менной" противокоррозионной защиты . . . 28

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Матросова Ю.Н., Потапова Н.Г. Методы автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов изделий перед сборкой . . . 32

Шеховцева Е.В. Сопоставление качества поверхностного слоя зубьев зубчатых колес после электроэрозионной обработки и обработки резанием . . . 40

Сутягин А.Н. Проблема обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей узлов трения . . . 44

Разборка. Ремонт

Годунов Н.Б. Расчет перемещаемого объема металла при восстановлении профилирующей накаткой втулок карданных передач . . . 48

Мамонтов В.А., Чеботарёв Ю.В., Куличкин Н.В. Восстановление деформированных судовых валов термомеханической правкой на основе ползучести . . . 50

Информация

Вартанов М.В., Гусев А.А. Международный научно-технический семинар "Современные технологии сборки" . . . 54

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу “Роспечать” – **79748**, Объединенному каталогу “Пресса России” – **84967**, каталогу "Почта России" – **60257**) или непосредственно в издательстве
Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@mashin.ru
Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

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

Региональные редсоветы
АСТРАХАНЬ
В.В. МИКИТЯНСКИЙ
БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО
БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО
ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН
А.А. СУПОНЯ
В.М. КОРНИЕНКО
ВОЛГОГРАД
В.Г. КАРАБАНЬ
М.Г. КРИСТАЛЬ
В.И. ЛЫСАК
В.М. ТРУХАНОВ
ИЖЕВСК
И.В. АБРАМОВ
Б.А. ЯКИМОВИЧ
В.Г. ОСЕТРОВ
И.К. ПИЧУГИН
КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ
КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ
КОЛОМНА
Ю.Д. АМИРОВ
КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН
В.И. ШПОРТ
А.М. ШПИЛЕВ
НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ
С.В. ДМИТРИЕВ
Р.М. ХИСАМУТДИНОВ
ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ
ОРЕЛ
Ю.С. СТЕПАНОВ
Г.А. ХАРЛАМОВ
ОРЕНБУРГ
А.Н. ПОЛЯКОВ
А.И. СЕРДЮК
А.П. ФОТ
РЫБИНСК
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ
В.В. НЕПОМИЛУЕВ
А.Н. СЕМЕНОВ
САМАРА
М.В. ЕВДОКИМОВ
Ю.А. ВАШУКОВ
Г.А. КУЛАКОВ
В.А. НИКОЛАЕВ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.Ф. КУЗЬМИН
Е.В. ШАЛОБАЕВ
ТОЛЬЯТТИ
А.И. РЫЖКОВ
Б.Ф. ХАЗОВ
ХАБАРОВСК
В.А. ЛАШКО

Украина
КИЕВ
А.С. ЗЕНКИН
В.А. МАТВИЕНКО
ДОНЕЦК
А.И. МИХАЙЛОВ
СЕВАСТОПОЛЬ
Е.Л. ПЕРВУХИНА
ХАРЬКОВ
Б.М. АРПЕНТЬЕВ

Беларусь
МИНСК
В.Л. БАСИНЮК
ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ
ПОЛОЦК
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.

© Издательство “Машиностроение”, “Сборка в машиностроении, приборостроении”, 2008

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

12 2008 (101)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Semenov A.N., Naumova S.A. Based regularity influence on the functional quality and reliability of machines . . . 3

Davidova N.S., Simakov A.L. Analysis of search ways of moving of details at facilities of adaptation for automated assembling . . . 9

Chumakov R.E. Power parameters research in assembling thread-forming screws into sheet material . . . 14

Skhuratov D.I., Sidorov S.Yu. Progressive constructions and assembling method of broken cutting surface emery-wheels . . . 18

Vartanov M.V., Vlasov A.I. Influence of thickness of glutinous layer on strength of connections body panels of cars . . . 21

Technological equipment for assembly

Vorkuev D.S. The utmost permissible operation conditions for the ratchet-gear overrunning clutch with the impact shocks considered . . . 24

Feeding of assembly lines. Packaging arrangement. Stoking. Packing

Trusov V.I., Kuzinova T.M., Garmashova I.V. New technologies of “temporary” anticorrosion protection . . . 28

Quality assurance. Testing. Monitoring

Matrosova Y.N., Potapova N.G. Techniques for computerized non-damaging control of materials porosity in production items prior to assembly . . . 32

Shekhovtseva E.V. Quality comparison of gearwheels tooth’s surface layers after electroerosive and cutting processing . . . 40

Sutyagin A.N. Guaranteeing wear resistance of surface layers of friction assemblies details . . . 44

The dismantling. Repair

Godunov N.B. Calculation of metal volume moved during restoring drive line bushes by shaping knurling . . . 48

Mamontov V.A., Chebotarev Y.V., Kulichkin N.V. Restoring of ship’s shafts by thermomechanical editing on the basis on creep . . . 50

Information

Vartanov M.V., Gusev A.A. International scientific-technical conference "Modern technologies in assembly" . . . 54

Journal is distributed on subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue of the "Rospechat" agency **79748**, the union catalogue "Pressa Rossii" **84967**, the catalogue "Pochta Rossii" **60257**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: (499) 268-38-42; ph./fax: 268-85-26. Fax: (499) 269-48-97.
http://www.mashin.ru E-mail: sborka@mashin.ru; tsmm@mashin.ru
Labor Red Banner Order Public Corporation "Publishing House "Mashine Building"
107076, Moscow, Stromynsky per. 4
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

MOSCOW
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.
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.
POLOTSK
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

© "Mashinostroenie Publishers", "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2008

УДК 621.9

А.Н. Семенов, *д-р техн. наук,* ***С.А. Наумова*** *(РГАТА им. П.А. Соловьева)*

Влияние закономерностей базирования деталей на функциональное качество и надежность машин

Рассмотрены вопросы теоретического обеспечения сборки. Показано, что при сборке ответственных изделий необходимо рассматривать схемы базирования деталей в узле. Приведены положения теории сборочного базирования, рекомендующие определять число сборочных связей по всем базовым поверхностям, учитывать влияние избыточных связей на качество сборки и надежность. Представлены возможные пути совершенствования технологии сборки.

Questions of theoretical maintenance of assemblage are considered. It is shown, that at assemblage of responsible products it is necessary to consider schemes of basing of details in knot. Positions of the theory of the assembly basing are resulted, recommending to define number of assembly communications on all base surfaces, to consider influence of superfluous communications on quality of assemblage and reliability. Possible ways of perfection of technology of assemblage are presented.

Ключевые слова: сборка, базирование, избыточные связи, надежность.

Key words: assemblage, basing, superfluous communications, reliability.

Одним из важнейших условий достижения высокого качества современной техники, снижения совокупных расходов на ее изготовление и эксплуатацию является надлежащий учет роли сборочного этапа, адекватной реальному значению сборки в формировании надежности технологических процессов и изделий.

Сборка является универсальным процессом, сопровождающим все этапы производства машин. Установка, закрепление заготовок и инструмента, настройка приборов и оборудования, разборка и ремонт машин являются сборочными процессами, во многом определяющими качество этих этапов и, соответственно, качество изделий машиностроения и приборостроения. Несмотря на это, в производстве к сборке чаще относятся как к элементарному процессу, не требующему научного обоснования, тщательной отработки технологии, высокой квалификации исполнителей.

Отношение к ней меняется при изготовлении прецизионных изделий или изделий ответственного назначения, когда требуемые качество и надежность приходится длительно доводить. Здесь доля сборочных работ может увеличиваться до половины и более от общей трудоемкости изготовления изделий, причиной чего являются необходимость индивидуального подхода к каждому изделию, использования многочисленных переборок и регулировок, отсутствие средств механизации и автоматизации сборочных работ, квалифицированного персонала, трудности прогнозирования результата сборки.

Видимыми *причинами недостатков технологии сборки* являются:

- неправильный выбор методов, режимов и последовательности выполнения операций;
- низкая квалификация исполнителей;
- несовершенство методов контроля.

Основной *причиной недостаточного уровня качества* на сборочном этапе является непонимание конструкторами и технологами-сборщиками особенностей взаимодействия и взаимовлияния присоединяемых деталей друг на друга, на выходные характеристики и надежность машин.

Такое положение вызвано недостаточным развитием теории сборки как самостоятельного этапа производственного цикла изготовления машин и важной составной части большинства технологических процессов, основными частями которой должны являться **размерный анализ и сборочная теория базирования.**

В настоящее время основным и, фактически, единственным теоретическим средством прогнозирования и подтверждения качества сборочных работ, является размерный анализ, выполняемый на основе *теории размерных цепей* [1] (несмотря на то, что ее положения основаны на ряде идеализаций):

♦ детали рассматривают как абсолютно жесткие тела. Их линейные размеры всегда постоянны и не изменяются под сборочными и внешними воздействиями;

♦ отсутствует влияние погрешностей взаимного расположения основных и вспомогательных базовых поверхностей;

♦ не учитывают динамический характер работы большинства изделий машиностроения, следствием которого являются мертвые ходы, упругие знакопеременные деформации, износ сопряженных поверхностей и т.п.;

♦ исключают взаимовлияние погрешностей составляющих звеньев и их воздействие на достижение точности замыкающего звена.

Считается, что достижение требуемой точности замыкающих звеньев размерных цепей обеспечивают использованием методов полной, неполной и групповой взаимозаменяемости; пригонки и регулирования, которые одновременно считаются методами сборки и, соответственно, наследуют перечисленные допущения.

Вследствие упрощенного подхода возникают погрешности, расхождение расчетных и фактических параметров сборки, что увеличивает сроки освоения изделий в производстве, снижает качество работы и надежность, приводит к рассеиванию значений выходных данных машин. Особенно негативно проявляются эти погрешности при изготовлении так называемых высокотехнологичных изделий, которые характеризуют высоким уровнем точности всех выходных параметров, напряженными режимами работы, отсутствием излишних запасов прочности конструкции, значительным назначенным ресурсом.

Анализ перечисленных методов сборки показывает, что в исходной постановке они не имеют самостоятельного значения, поскольку являются только способами решения размерных цепей. Происходит подмена целевой функции сборочной стадии производства возможностью выполнения размерных расчетов, в результате которых определяют диапазон допустимых значений замыкающего звена как суммарной погрешности составляющих звеньев. Поэтому при повышенных требованиях к точности среди прочих методов гораздо шире используют пригонку и регулировку, снижающие разброс выходных параметров изделия, а для отдельных случаев разрабатывают методики, уточняющие исходную, на основе введения понятий нежестких [2], динамических [3] и эксплуатационных размерных цепей.

Помимо перечисленных, в практике также разработаны методы активной сборки:

○ с компенсирующими материалами, оптимизированным подбором пригоночных деталей, по фактическим размерам [4];

○ индивидуальной селекции по действительным значениям выходного параметра качества узла [5];

○ с учетом физических параметров [6];

○ виртуальные технологии, позволяющие проводить оптимизацию параметров точности и проверять собираемость отдельных узлов и машин с помощью трехмерных моделей на базе CAD-систем [7, 8].

Анализ перечисленных способов сборки показывает, что общим свойством большинства из них является использование технологических компенсирующих воздействий, нейтрализующих негативные эффекты сборочного взаимодействия деталей, которые проявляются в нестабильности качества и недостаточной надежности.

Для правильной работы каждой машины необходимо обеспечить определенное взаимное расположение ее деталей и узлов, а при механической обработке и заготовки должны быть правильно ориентированы относительно механизмов и узлов станков, определяющих траектории движений формообразования.

Все задачи пространственной ориентации твердых тел относительно выбранной системы координат, деталей и заготовок в машинах и на станках объединяют понятием "базирование". Несмотря на различие этих задач, их решают теоретически одинаковыми методами – посредством наложения определенных ограничений (связей) на возможные перемещения заготовки или детали в пространстве.

В основе технологической теории базирования, разработанной Б.С. Балакшиным, лежат положения теоретической механики о базировании твердых тел. Неадекватное решаемым задачам использование этих положений, в которых оперируют идеальными связями, приводит к множеству противоречий. Поэтому *для повышения достоверности теории базирования* в технологической науке разработан ряд мероприятий:

■ обоснованный выбор базирующих поверхностей детали;

■ снижение контактных деформаций путем ограничения отклонений поверхностей от правильной формы и уменьшения шероховатости;

■ выбор точек приложения замыкающих сил для уменьшения собственных деформаций деталей;

■ регламентация последовательности приложения сил, чтобы не вызвать изменения положения детали во время ее закрепления;

■ использование дополнительных опор для повышения жесткости детали, которые обеспечили бы достаточную адекватность ее положений в искусственно создаваемых в процессах обработки деталей временных технологических средах.

Особенностью существующего состояния в теории машиностроительной сборки является тот факт, что вопросам базирования деталей в сборочных образованиях практически не уделяют внимание. Широкое использование новых технологических приемов, которые не вписываются в существующую классификацию методов сборки, является признаком недостаточного теоретического уровня сборки как этапа, формирующего основные показатели машин. Анализ этих способов сборки показывает, что неявной причиной их разработки является отсутствие учета внутренних связей между деталями, т.е. закономерностей их сборочного взаимодействия.

Механические связи, возникающие на базовых поверхностях деталей при сборке и лишающие ее возможных перемещений по координатным направлениям, являются совершенно реальными и должны рассматриваться в полном составе с учетом их физических свойств. Естественно, что такими связями являются места фактического контакта: взаимные контакты единичных неровностей поверхностей стыков, которые обладают упругой или пластической податливостью и несущими свойствами.

Количество таких связей при свободном прилегании деталей по плоским базовым поверхностям локализуется на трех контурных площадках, а в условиях силового замыкания должно намного превышать это минимально необходимое число, чтобы обеспечить несущую способность стыков.

В большинстве практических случаев базирование детали в сборочном образовании осуществляют одновременно по основным и вспомогательным базовым поверхностям, что при силовом замыкании приводит к многократному возрастанию мест фактического контакта, т.е. числа сборочных связей, и означает формирование множества связей. Совокупность сборочных связей по всем контактным поверхностям практически во всех ситуациях превышает минимально необходимое количество, что означает избыточное базирование детали, которое функционально необходимо, но и вызывает большинство негативных последствий при реализации сборки и эксплуатации изделий.

Для упрощения восприятия закономерностей сборочного базирования деталей и оценки степени избыточности базирования целесообразно использовать минимально допустимую идеализацию – рассматривать по каждой базовой поверхности только равнодействующие реальных контактных связей, обеспечивающие устойчивость и определенность их базирования – свойства, при которых поверхность не изменяет свое положение под воздействием технологических или эксплуатационных нагрузок.

Число таких связей составляет:

■ плоская поверхность – 3;

■ цилиндрическая – 4;

■ резьбовая – 5;

■ коническая – 6 [9].

Анализируя схемы базирования деталей по всем поверхностям, можно определить структуру и суммарное число таких связей, которые будут существенно отличаться от рекомендуемых теоретической механикой для регламентации положения твердых тел в пространстве.

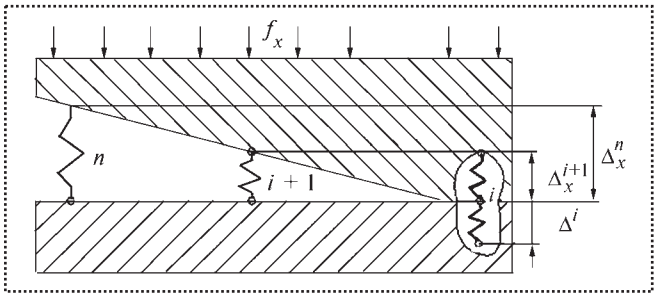
На основании данного подхода можно констатировать, что базирование большинства деталей, устанавливаемым в узлах по нескольким базовым поверхностям, будет осуществляться с избыточным количеством связей, т.е. совокупное число структурных связей на всех контактных поверхностях может значительно превышать число шесть, считающееся необходимым и достаточным для придания деталям определенности пространственного расположения. Поэтому такие детали приобретают статическую неопределимость – состояние, которое весьма критично к точности размеров, влиянию и изменению внешних условий, но проявляется при повышенных требованиях к точности выходных параметров и надежности узлов и машин.

Проблема избыточности базирования деталей в сборке завуалирована во многом из-за того, что при проектировании узлов в размерных расчетах

точности идеализируют форму деталей так называемыми прилегающими поверхностями. Это приводит к тому, что погрешности расположения вспомогательных базовых поверхностей относительно основных баз, в отдельных случаях задаваемые в виде торцовых биений, отклонений от параллельности, перпендикулярности и т.п., обычно не учитывают в размерных расчетах точности сборки и при прогнозировании работоспособности, а стыки вспомогательных баз становятся несогласованными, т.е. не совпадают.

В большинстве же случаев при сборке нужно обеспечить условия плотного контакта поверхностей и нераскрытия стыков, для чего используют **силовое замыкание** – принуждение деталей к образованию плотных стыков, необходимое для формирования сборочных связей между поверхностями. Механизм формирования сборочных связей между вспомогательными базами деталей может быть представлен на примере начально несогласованного стыка, в котором сборочные связи – места фактического контакта – моделируются парой симметричных пружин сжатия i, а потенциальные сборочные связи (i+1, n) представляют собой односторонние упругие опоры малой жесткости (см. рисунок).

Места фактического контакта i всегда будут находиться в сжатом состоянии и работать как двухсторонние (симметричные) связи на растяжение–сжатие [10], что отражает возможность раскрытия стыка в эксплуатации при его недостаточной предварительной деформации Δ_x. Приложение замыкающей силы к элементам сборочной системы в виде распределенной нагрузки f_x приводит к деформационному формированию стыка и образованию n-го числа сборочных связей. Этому процессу соответствует постепенное уменьшение соответствующих зазоров и последовательное увеличение



Модель стыка несогласованных базовых поверхностей деталей

деформаций первичных контактов на величины от Δ_x^{i+1} до Δ_x^n, которое оценивают как сближение удаленных точек базовых поверхностей в местах приложения сил и податливость стыка.

Силовое замыкание стыков создает однонаправленные реакции образующихся сборочных связей, которые помимо положительных – функционально-необходимых свойств, могут обладать негативными свойствами, отрицательно влияющими на работоспособность деталей и узлов. Качество свойств реакций может определяться по степени их совпадения с конструктивно заданным направлением силового замыкания узла: чем больше тангенциальные составляющие реакций, тем более негативно они влияют на напряженное и деформированное состояние деталей узла.

Негативные последствия избыточных связей появляются и от моментов их реакций и, в совокупности, обычно проявляются в виде торцовых и радиальных биений, неадекватного напряженного состояния деталей, непрямолинейности осей, динамической неуравновешенности, неравномерного приработочного износа подвижных стыков и рассеивания сборочных параметров.

Любое приложение сборочных сил приводит к объемному деформированию деталей и предполагает создание функционально-необходимой энергии U_E сборочного образования, которое выражают через давление p в стыке и деформации контактных связей Δ_x по всей номинальной площади контакта S:

$$U_E = \frac{1}{2}\int_S p\Delta_x dS.$$

Дополнительная деформация узла Δ_x^n, необходимая для образования контактных связей между изначально несогласованными между собой поверхностями стыка, приводит к повышению энергии собираемых деталей на величину U_E^*, пропорциональную жесткостям деформируемых деталей и погрешностям расположения их вспомогательных баз. Поэтому общий уровень энергии сборочной системы при начальной несогласованности стыков будет составлять

$$V^* = U_E + U_E^*,$$

что противоречит принципу минимума полной потенциальной энергии по классической теореме Ла-

гранжа, в соответствии с которой эта энергия должна быть минимальна, и иметь стационарное значение. Именно поэтому сборочная система будет стремиться перейти в равновесное и более устойчивое состояние, что осуществляется путем деформационного искажения базирующих деталей, релаксации напряжений, изменения динамического состояния в полях центробежных сил.

Неравновесное напряженно-деформированное состояние деталей является основной причиной низкой надежности сборочной системы и ее нестабильности. Вероятностный подход к обеспечению надежности, основанный на фактическом использовании случайного сочетания размеров деталей ответственных узлов, отражаемый разбросом размеров составляющих звеньев размерных цепей, существенно расширяет и рассеивание работоспособности изделий. Причиной этого часто является резко нелинейная зависимость основных выходных параметров, имеющих разнообразную физическую природу, от геометрической точности деталей. Именно поэтому, практически в каждой высокотехнологичной отрасти машиностроения, отрабатываются специальные способы сборки и доводки, фактически имеющие одну физическую природу и указывающие на отсутствие современной теории сборки, которая должна быть основана на знании физических процессов формирования сборочных связей между деталями.

В теории и практике машиностроения сложилось множество способов обеспечения работоспособности, эффективность которых определяют вероятностью преодоления негативных последствий избыточности, поскольку до настоящего времени закономерности сборочного базирования деталей не учитывают. Существующие рекомендации по ранжированию базовых поверхностей, предлагаемые в учебной и методической литературе для выбора главных баз и посадок базовых поверхностей, основываются лишь на условном соотношении площадей контакта соответствующих баз и не учитывают их функционального назначения. Избыточность же базирования, формируемая в процессе соединения деталей, практически не соотносится с проблемами качества сборки.

Основным способом преодоления негативного влияния избыточности базирования в неподвижных сопряжениях является создание условий для минимизации деформационного искажения сопрягаемых деталей, т.е. предварительное согласование поверхностей стыков и, тем самым, минимизация величины дополнительной энергии от негативных реакций избыточных связей. Такой подход неявным образом отражается в распространенных практических способах конструирования и эксплуатации узлов:

♦ обеспечение возможности самоустанавливания деталей путем понижения класса кинематических пар;

♦ повышение точности изготовления деталей;

♦ деформационная компенсация (уменьшение жесткости отдельных участков детали для повышения податливости – упругие болты, упруго-демпферные опоры подшипников газотурбинных двигателей);

♦ макроприработка – прогнозируемый износ в узлах с избыточным базированием подвижных деталей.

Наиболее известными сборочными способами, которые дополняют и повышают эффективность конструкторских приемов, являются сборочные приемы с взаимной компенсацией погрешностей сопрягаемых деталей: совместная механическая обработка, подгонка, регулировка, подбор деталей по фактическим размерам, а также ряд современных способов, основанных на учете индивидуальных свойств сопрягаемых деталей и их взаимного расположения.

Сущность большинства вышеперечисленных способов взаимной компенсации погрешностей базирования сопрягаемых поверхностей заключается во взаимном поглощении противоположных по знаку отклонений расположения вспомогательных баз сопрягаемых деталей относительно основной базы для достижения оптимального состояния сборочной системы.

В качестве **критериев оптимизации** могут быть использованы размерные и физические характеристики качества, которые обеспечиваются при соблюдении общего условия: достижения плотного прилегания вспомогательных базирующих поверхностей, что обеспечивает минимальные негативные деформации сборочной системы. Именно эти особенности реализаций сборочного взаимодействия деталей свидетельствуют о необходимости учета особенностей базирования деталей при сборке,

механизма формирования сборочных связей между сопрягаемыми поверхностями деталей узлов, к которым предъявляют повышенные требования к точности и надежности функционирования.

Таким образом, можно сделать выводы, что отсутствие теории базирования, адекватной потребностям сборки, которая учитывает особенности взаимодействия деталей, является основной причиной проблем с качеством в сборочном производстве и надежностью.

Неуправляемое образование стыков между вспомогательными базами деталей с избыточным базированием, осуществляемое путем их деформационного принуждения, формирует комплекс непрогнозируемых последствий для работоспособности и приводит к рассеиванию функциональных параметров изделий.

Согласование стыков между вспомогательными базами деталей может проводиться на всех этапах жизненного цикла машин. Приоритетными возможностями обладает производственный этап, в котором этот процесс может быть реализован при изготовлении деталей, сборке или испытании изделий. Наибольшими возможностями обладает сборочный этап, на котором могут использоваться как традиционные способы сборки, так и сборка с компенсирующими воздействиями на источники возмущения сборочной системы.

Вывод

Организация и проектирование сборочного процесса на основе анализа схем базирования деталей в узлах, выявления "избыточных" с позиций механики, но функционально-необходимых сборочных связей между базовыми поверхностями, позволит снять проблему нестабильности сборочных параметров и эксплуатационной надежности узлов и машин высокого ресурса и ответственного назначения. Данный подход позволит снизить временны́е и материальные затраты на освоение новых изделий путем обоснованного назначения способа сборки.

Библиографический список

1. **Цепи размерные.** Основные понятия, методы расчета линейных и угловых цепей: Методические указания РД 50-635–87. М.: Изд-во стандартов, 1987. 42 с.
2. **Непомилуев В.В.** Нежесткие размерные цепи // Проблемы повышения качества промышленной продукции. Сб. трудов 3-й межд. научн.-техн. конф. Брянск: БГТУ. 1998. С. 51–54.
3. **Бакаев Н.А.** Динамическая задача расчета линейной размерной цепи, содержащей упругий компенсатор // Изв. вузов. Машиностроение. 1985. № 6. С. 36–39.
4. **Непомилуев В.В.** Технология виртуальной сборки – способ автоматизации индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2000. № 1. С. 31–35.
5. **Патрик Л.И.** Технология и оборудование для сборки машин в условиях компьютеризированного производства // СТИН. 1996. № 5. С. 7–12.
6. **Венцлавский И.В.** Технология сборки прецизионных деталей агрегатов на принципе равножесткости: ЦНТИ "Поиск". 1994. 58 с.
7. **Брюханов В.Н.** Предпосылки к созданию виртуальной технологии // СТИН. 1999. № 6. С. 16–20.
8. **Непомилуев В.В.** Технология виртуальной сборки – способ автоматизации индивидуального подбора деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2000. № 1. С. 31–35.
9. **Семенов А.Н.** Закономерности базирования деталей в сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2005. № 3. С. 3–7.
10. **Митрович Р.** Распределение нагрузки между телами качения шариковых подшипников // Вестник машиностроения. 2000. № 3. С. 14–19.

УДК 621.757

Н.С. Давыдова, А.Л. Симаков, *д-р техн. наук*

Анализ поисковых траекторий перемещения в средствах адаптации деталей для автоматизированной сборки

Предложены критерии анализа поисковых траекторий в средствах адаптации деталей для автоматизированной сборки. Проведен сравнительный анализ процесса сканирования поверхности базовой детали для случаев перемещения присоединяемой детали по поисковой траектории в форме спирали Архимеда и синусоиды.

Analysis criterions of searching trajectory in details adaptation means for automated assembling have been suggested. The comparative analysis of the scanning process of base detail surface for cases of connection detail movement on the searching trajectory of Archimedean spiral and a sinusoid have been advanced.

Ключевые слова: средство адаптации деталей для автоматизированной сборки, присоединяемая деталь, базовая деталь, поисковая траектория, плоская математическая кривая, алгебраические спирали, периодические кривые, алгебраические кривые, критерий оценки поисковых траекторий, производительность средства адаптации, степень подвижности присоединяемой детали, стратегия сканирования поверхности.

Key words: facility of adaptation of details for automatization assembling, addition detail, base detail, search way, flat mathematical curve, algebraical spirals, periodic curves, algebraical curves, criterion of evaluation of search ways, productivity of facility of adaptation, degree of freedom of addition detail, strategy of investigation of surface.

При ориентации деталей для автоматизированной сборки методом ненаправленного поиска осуществляют сканирующее перемещение присоединяемой детали по поверхности базовой детали по определенной траектории, обеспечивающей высокую степень вероятности совмещения соединяемых поверхностей. В качестве возможных вариантов траекторий автопоиска могут быть рассмотрены известные в настоящее время плоские математические кривые. Исследование влияния выбора типа траектории автопоиска на качество адаптации деталей в литературе до сих пор не проводилось.

В статье проведен анализ существующих плоских математических кривых как вариантов поисковых траекторий для реализации в средствах адаптации деталей для автоматизированной сборки.

В качестве *критериев для оценки поисковых траекторий* выбраны:

♦ площадь поверхности, охватываемой при перемещении детали по кривой;

♦ время, за которое деталь заданного размера может просканировать поверхность заданной площади;

♦ степени свободы присоединяемой детали, необходимые для получения требуемой траектории автопоиска.

Для описания поисковых траекторий движения детали целесообразно рассмотреть существующие плоские математические кривые. Практический интерес представляют кривые, которые можно реализовать простыми механическими устройствами.

К *плоским математическим кривым* относят [1]:

■ алгебраические спирали;
■ периодические кривые;
■ алгебраические кривые.

Рассмотрим каждую из перечисленных кривых.

Существует несколько типов *алгебраических спиралей* [2]:

- спираль Архимеда;
- спираль Галилея;
- спираль гиперболическая;
- жезл;
- спираль Корню;
- спираль логарифмическая;
- спираль параболическая;
- розы;
- спираль синусоидальная;
- SICI-спираль;
- спираль Ферма.

Одним из **критериев выбора** математической кривой в качестве траектории автопоиска в устройстве ориентации **является простой способ ее получения.**

Для перемещения детали по спирали Архимеда, гиперболической спирали, логарифмической спирали, SICI-спирали (рис. 1) сборочная головка должна иметь одновременно две степени свободы:

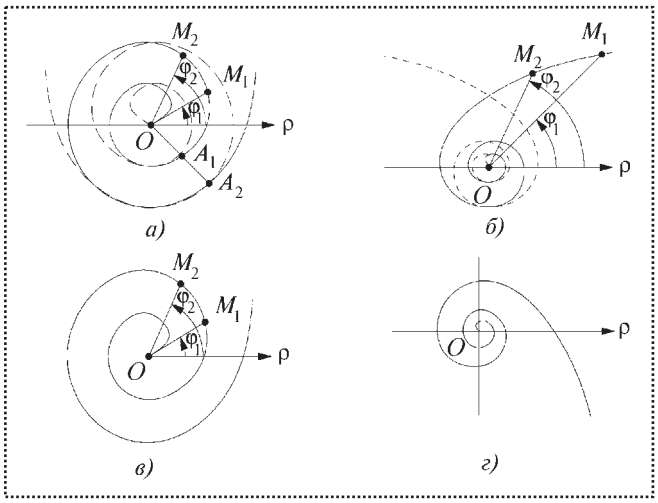


Рис. 1. Алгебраические спирали:
а – спираль Архимеда; *б* – спираль гиперболическая; *в* – спираль логарифмическая; *г* – SICI-спираль; *М* – точка, расположенная на присоединяемой детали; ρ – ось полярной системы координат; *О* – центр полярной системы координат; φ – угловая координата текущей точки

поступательную вдоль некоего луча и вращательную относительно его полюса.

Спираль *Галилея* не позволяет выполнить сканирование поверхности базовой детали так тщательно, как спираль *Архимеда*. Существуют зоны необоснованного перекрытия ранее отсканированных участков.

В процессе сканирования базовой поверхности по *жезлу, спирали Ферма, параболической спирали* присоединяемая деталь должна иметь одновременно две степени свободы: поступательную вдоль некоего луча и вращательную, при этом необходимо предусмотреть возможность изменения направления вращения присоединяемой детали в полюсе *О* на противоположное.

Для поисковых траекторий в форме *спирали Корню, роз, синусоидальной спирали* присоединяемая деталь должна обладать двумя поступательными вдоль осей *x* и *y* и одной вращательной степенями свободы.

На основе анализа форм алгебраических спиралей можно сделать вывод, что спираль Архимеда, гиперболическая спираль, логарифмическая спираль, SICI-спираль – это наиболее простые в реализации кривые. При этом гиперболическая и SICI-спирали – раходящиеся. Спираль Архимеда и логарифмическая спираль имеют постоянный шаг, отличаются лишь направлением закручивания.

Правильный подбор параметров этих кривых обеспечит наиболее тщательное сканирование поверхности и позволит свести зоны перекрытия ранее отсканированных участков к минимуму.

Таким образом, среди алгебраических спиралей **спираль Архимеда и логарифмическая спираль являются оптимальными** для использования в качестве поисковых траекторий в устройствах ориентации деталей для автоматизированной сборки *как кривые, наиболее просто воспроизводимые механическим устройством, обеспечивающие тщательное сканирование базовой поверхности с минимальным количеством участков, проходимых повторно в процессе ориентации.*

Рассмотрим процесс сканирования поверхности базовой детали по спиральной траектории на примере **спирали Архимеда** как *более изученной* математической кривой *по сравнению с логарифмической спиралью*. Для анализа значений площади сканируемой поверхности при перемещении детали по спирали Архимеда и времени сканирования примем:

- базовая поверхность – квадрат размером 100×100 мм;
- присоединяемая деталь – цилиндр диаметром 10 мм;
- скорость перемещения сборочной головки, удерживающей присоединяемую деталь, относительно поверхности базовой – 30 мм/с;
- стратегия сканирования: присоединяемая деталь начинает движение из центра базовой поверхности по спирали Архимеда с шагом, равным диаметру присоединяемой детали, таким образом, чтобы последняя могла охватить поверхность максимально возможной площади, но не выходила за пределы сканируемой поверхности (рис. 2); траектория автопоиска реализуется идеально.

Спираль Архимеда – плоская трансцендентная кривая, траектория т. *М* (см. рис. 1), движущейся из точки *О* с постоянной скоростью по лучу, вращающемуся около полюса *О* (см. рис. 2) с постоянной угловой скоростью, описываемая уравнением в полярных координатах [3]:

$$\rho = a\varphi, \tag{1}$$

где *a* – постоянная:

$$a = \frac{OA}{2\pi}; \tag{2}$$

OA – шаг спирали Архимеда [1].

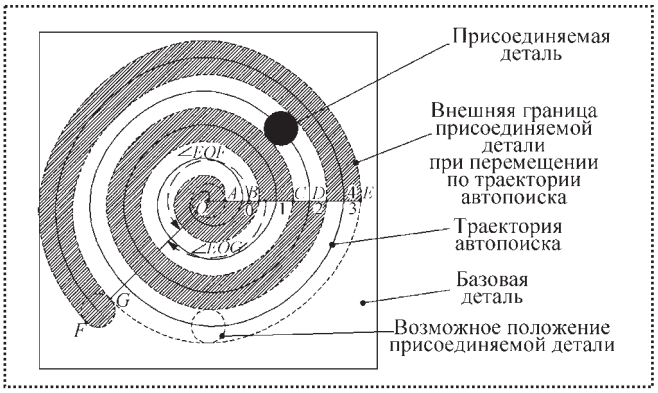


Рис. 2. Схема сканирования присоединяемой деталью поверхности базовой детали по спирали Архимеда:
1, *2*, *3* – положения присоединяемой детали в конце полного круга

Площадь S_A отсканированной поверхности при перемещении присоединяемой детали по поверхности базовой детали по спирали Архимеда будет равна (см. рис. 2)

$$S_A = \frac{\angle EOF}{6}(OE^2 + OE \cdot OF + OF^2) + \\ + \frac{\angle EOG}{6}(OE^2 + OE \cdot OG + OG^2) + \frac{\pi r^2}{2}, \quad (3)$$

где $\angle EOF$ – угол, ограниченный отрезками OE и OF, рад; OE, OF, OG – длина отрезков, мм; $\angle EOG$ – угол, ограниченный отрезками OE и OG, рад; r – радиус присоединяемой детали, мм.

Длительность процесса сканирования поверхности базовой детали при перемещении присоединяемой детали по математической кривой равна

$$t = \frac{l}{\text{v}}, \quad (4)$$

где l – длина траектории автопоиска; v – скорость перемещения сборочной головки, удерживающей присоединяемую деталь, относительно поверхности базовой детали.

Длина дуги спирали Архимеда l_a между точками $M_1(\rho_1, \varphi_1)$ и $M_2(\rho_2, \varphi_2)$ (см. рис. 1) равна [2]

$$l_a = \frac{a}{2}[\varphi\sqrt{1+\varphi^2} + \ln(\varphi + \sqrt{1+\varphi^2})]_{\varphi_1}^{\varphi_2}. \quad (5)$$

Кривизну K математической кривой определяют по формуле [1]

$$K = \frac{1}{R}, \quad (6)$$

где R – радиус кривизны математической кривой, в начальной точке R_0 равный [1]

$$R_0 = \frac{a}{2}, \quad (7)$$

а в остальных точках его рассчитывают по формуле [1]

$$R_a = a\frac{\sqrt{(\varphi^2+1)^3}}{\varphi^2+2}. \quad (8)$$

Периодические кривые представлены на рис. 3.

Для сканирования поверхности базовой детали по синусоидальной поисковой траектории (см. рис. 3, *а*) и по поисковой траектории в форме циклоиды (см. рис. 3, *б*) сборочная головка должна обладать одновременно двумя поступательными степенями свободы вдоль осей x и y. При этом направление перемещения присоединяемой детали по оси y должно периодически меняться на противоположное.

Из анализа наиболее целесообразных схем сканирования поверхности базовой детали по этим траекториям автопоиска (рис. 4) видно, что для перемещения присоединяемой детали по циклоиде сборочная головка должна выполнять более сложные манипуляции, чем для получения синусоиды. Применение синусоидальной траектории обеспе-

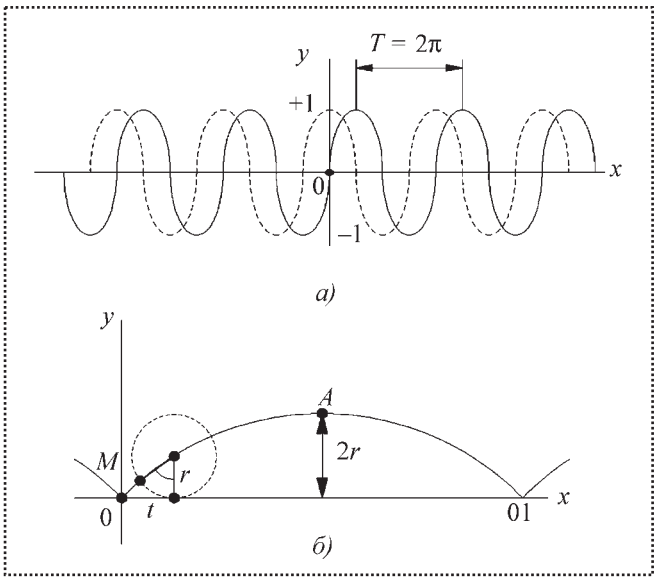


Рис. 3. Периодические кривые:
а – синусоида; *б* – циклоида

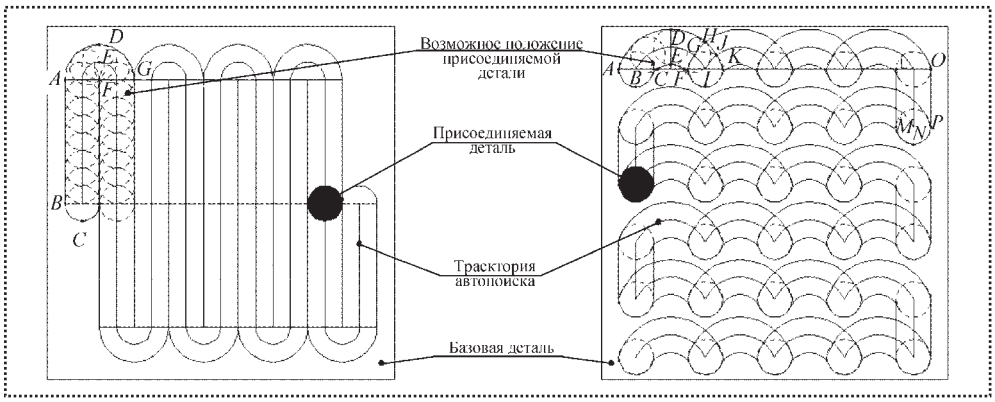


Рис. 4. Схемы сканирования присоединяемой деталью поверхности базовой детали:
а – присоединяемая деталь перемещается по траектории в форме синусоиды; *б* – присоединяемая деталь перемещается по траектории в форме циклоиды

чивает более тщательное сканирование базовой поверхности с минимальной площадью зон перекрытия отсканированных участков.

Таким образом, анализ процесса сканирования поверхности базовой детали по периодической траектории выполним на примере синусоиды как наиболее простой в получении механическим устройством периодической кривой, позволяющей выполнить сканирование наиболее тщательно.

Синусоида – плоская непрерывная кривая с периодом $T = 2\pi/b$, описываемая уравнением в декартовых координатах:

$$y = a'\sin(bx + c), \tag{9}$$

где a', b, c – постоянные, определяющие степень соответственно вытянутости кривой вдоль оси ординат, сжатия кривой по оси абсцисс, величину сдвига кривой по фазе по оси абсцисс.

Параметры базовой и присоединяемой деталей, скорость перемещения сборочной головки, удерживающей присоединяемую деталь относительно поверхности базовой, те же, что и при анализе спирали Архимеда.

Исходя из принятых условий ориентации сопрягаемых деталей, оптимальную кривую автопоиска описывают следующим уравнением в декартовой системе координат:

$$y = 40\sin x.$$

Такая кривая позволяет наиболее тщательно выполнить сканирование за одно прохождение сборочной головки вдоль базовой детали за короткий промежуток времени. При этом присоединяемая деталь наполовину диаметра не доходит до внешней границы базовой детали, что предотвращает выход первой за пределы второй в процессе движения.

Идеально реализовать синусоиду механическим устройством невозможно, поэтому выберем схему сканирования, изображенную на рис. 4. Считаем, что стороны срезов базовой детали перпендикулярны. На участках *AB* присоединяемая деталь двигается строго параллельно правому срезу базовой детали из его середины. Переместившись на 35 мм, она описывает дугу окружности относительно т. *F* радиусом $EF = 5$ мм. Далее деталь снова двигается 35 мм строго параллельно правому срезу базовой детали. Аналогично реализуют отрицательную полуволну траектории.

Таким образом, формируют оптимальную для данного случая траекторию амплитудой 40 мм и периодом, равным трем диаметрам присоединяемой детали (30 мм). Присоединяемая деталь при перемещении не выходит за пределы сканируемой поверхности. Траектория автопоиска реализуется идеально.

Площадь S_c отсканированной поверхности при перемещении присоединяемой детали по поверхности базовой детали по синусоиде определим по формуле (см. рис. 4)

$$S_c = 8\left(ABAG + \frac{\pi AF^2}{2}\right) + \pi r^2. \tag{10}$$

Длина дуги l_c синусоиды в диапазоне полупериода равна

$$l_c = 16AB + 8\pi r. \tag{11}$$

При анализе изменения радиуса кривизны синусоиды примем, что его величина на линейных участках *AB* равна бесконечности. Кривизну синусоиды определяют по формуле (6).

В вершине *E* радиус кривизны кривой полностью совпадает с радиусом кривизны синусоиды, описываемой уравнением в декартовой системе координат $y = 40\sin x$, и находится по формуле

$$R_c = \frac{\sqrt{(1 + (40\cos x)^2)^3}}{40\sin x}. \tag{12}$$

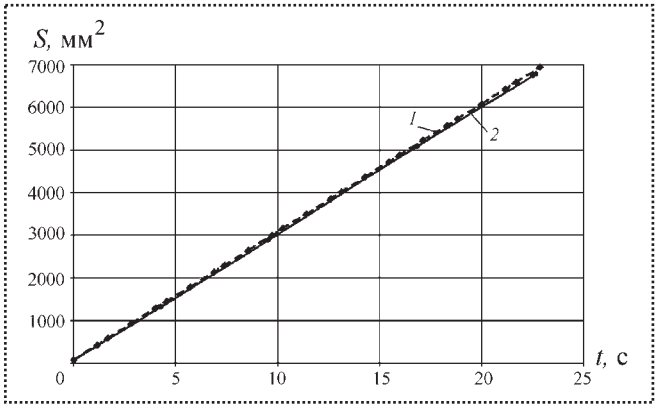


Рис. 5. Графики изменения площади сканируемой поверхности от времени:
1 – при перемещении присоединяемой детали по синусоиде; *2* – при перемещении присоединяемой детали по спирали Архимеда

Графики зависимости изменения площади сканируемой поверхности при перемещении присоединяемой детали по спирали Архимеда и синусоиде от времени изображены на рис. 5.

К алгебраическим кривым относят кубическую параболу, квадратичную параболу, улитку Паскаля, полукубическую параболу, эпициклоиду и др.

Графики зависимости изменения кривизны кривой от радиуса кривизны для спирали Архимеда и синусоиды изображены на рис. 6.

Большинство алгебраических кривых очень сложны для реализации механическими устройствами. К тому же при движении детали даже по оптимальной плоской алгебраической кривой невозможно просканировать поверхность базовой детали за один проход. Для устранения этого недостатка можно изменить схему сканирования поверхности базовой детали за счет либо смещения детали после первого прохода по траектории, либо периодического изменения параметров кривой. Это приводит к существенному увеличению времени ориентирования сопрягаемых деталей.

Таким образом, применение плоских алгебраических кривых в качестве поисковых траекторий не позволяет добиться непрерывного сканирования поверхности базовой детали присоединяемой деталью за кратчайший промежуток времени.

Анализ полученных результатов показывает, что наиболее простыми из известных математических кривых при формировании механическим устройством являются спираль Архимеда и синусоида. За один и тот же промежуток времени при одинаковых условиях, перемещая присоединяемую деталь по синусоидальной поисковой траектории, возможно сканировать большую площадь (приблизительно на 100 мм^2) базовой поверхности, чем при перемещении детали по спирали Архимеда.

Кривизна спирали Архимеда достигает максимума в полюсе и равномерно уменьшается от полюса к последней точке траектории.

Кривизна синусоиды максимальна в вершинах и неравномерно, скачками уменьшается по мере приближения к точкам перегиба до нуля.

Кривизна синусоидальной траектории автопоиска в вершине приблизительно в 31 раз больше, чем кривизна спирали Архимеда в полюсе. Это значит, что *в вершине синусоидальной траектории* присоединяемая деталь двигается с высоким ускорением. Механизм перемещения сборочной головки на этом участке будет испытывать значительные нагрузки и быстрее изнашиваться.

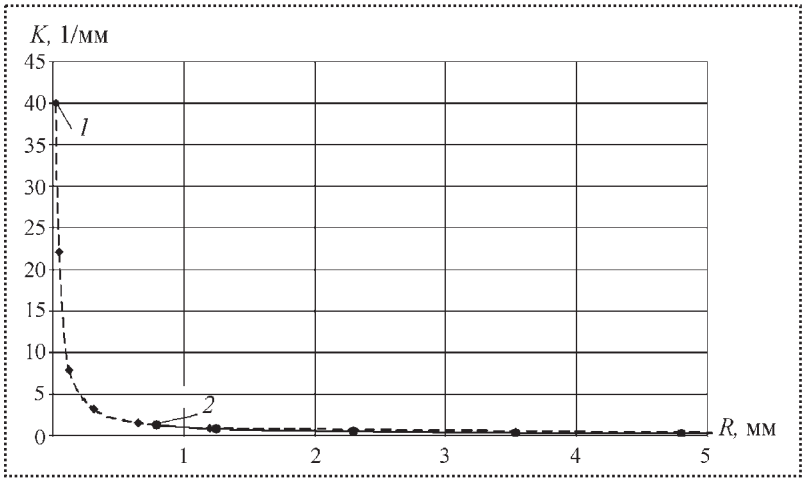


Рис. 6. Графики зависимости кривизны кривой от радиуса кривизны:
1 – при перемещении присоединяемой детали по траектории в форме синусоиды; *2* – при перемещении присоединяемой детали по траектории в форме спирали Архимеда

Вывод

Наиболее предпочтительным вариантом траектории автопоиска в устройствах адаптации деталей является спираль Архимеда.

Библиографический список

1. **Выгодский М.Я.** Справочник по высшей математике. М.: Государственное изд-во физико-математической литературы, 2001.

2. **Математическая** энциклопедия. Ред. коллегия: И.М. Виноградов (глав. ред.) и др. Т. 1. М., "Советская энциклопедия", 1977. 1152 с.

3. **Математический** энциклопедический словарь / под ред. Ю.В. Прохорова. М.: Советская энциклопедия, 1988. 847 с.

УДК 621.757

Р.Е. Чумаков, *канд. техн. наук (Читинский государственный университет)*

Исследование силовых показателей при монтаже резьбообразующих винтов в листовой материал

Представлено исследование силовых показателей сборочного процесса при завинчивании резьбообразующих винтов в листовой материал. Рассмотрены условия сборки пакета разнородных листовых материалов. Определены показатели устойчивости резьбового соединения.

The analysis of power parameters of assembling process in thread-forming screwing on into sheet material has been shown. The conditions of assembling a pack of heterogeneous sheet materials have been examined. Stability indices of a threaded fastener have been determined.

Ключевые слова: сборка, резьбообразующие винты, листовой материал.

Key words: assembly, thread-forming screws, sheet material.

Введение

В автомобильной промышленности, авиастроении, в производстве оргтехники и других отраслях широко применяют самонарезающие и резьбовыдавливающие винты. Их используют, главным образом, для соединения листовых материалов и пластмасс. По данным института промышленного крепежа (IFI – Industrial Fasteners Institute) ежегодно в США используется более 200 млрд крепежных изделий. Автомобильная промышленность потребляет более половины самонарезающих винтов [4]. В производстве электронной техники, там, где по техническим требованиям нежелательно образование стружки, используют резьбовыдавливающие винты.

Устойчивость резьбового соединения определяют эксплуатационные показатели получаемого изделия. Для пакета листовых материалов важным показателем является устойчивость соединения на сдвиг. Для построения эффективных систем автоматической сборки важен анализ крутящих моментов в процессе резьбообразования.

Крутящие моменты в процессе сборки винтов в листовой материал

Процесс внедрения самонарезающего винта в отверстие листового материала напоминает, скорее, не резьбообразование, а профилеобразование. Он охватывает следующие переходы:

- ориентация винта по оси отверстия;
- создание осевой силы;
- завинчивание с прорезанием профильного паза;
- затяжка пакета соединяемых листов.

Основные параметры профилеобразования представлены на рис. 1.

Крутящий момент профилеобразования определяют две составляющие:

■ момент от действия сил прорезания паза с соответствующими реактивными составляющими в противоположной точке контакта (рис. 1, *г*);

■ момент от действия сил $P_г$ отгибания лепестков паза:

$$M_{кр} = P_\tau \frac{d}{2},$$

где d – наружный диаметр резьбы;

P_τ – тангенциальная составляющая силы завинчивания, равная

$$P_\tau = P_{пр} f_п + (2P_г \cos\psi + N) f; \qquad (1)$$

$P_{пр}$ – сила прорезания паза;

$f_п$ – коэффициент пластического трения;

$P_г$ – сила гибки листа;

ψ – угол подъема резьбы;

N – реактивная составляющая силы гибки в противоположной точке контакта;

f – коэффициент трения в резьбовом контакте.

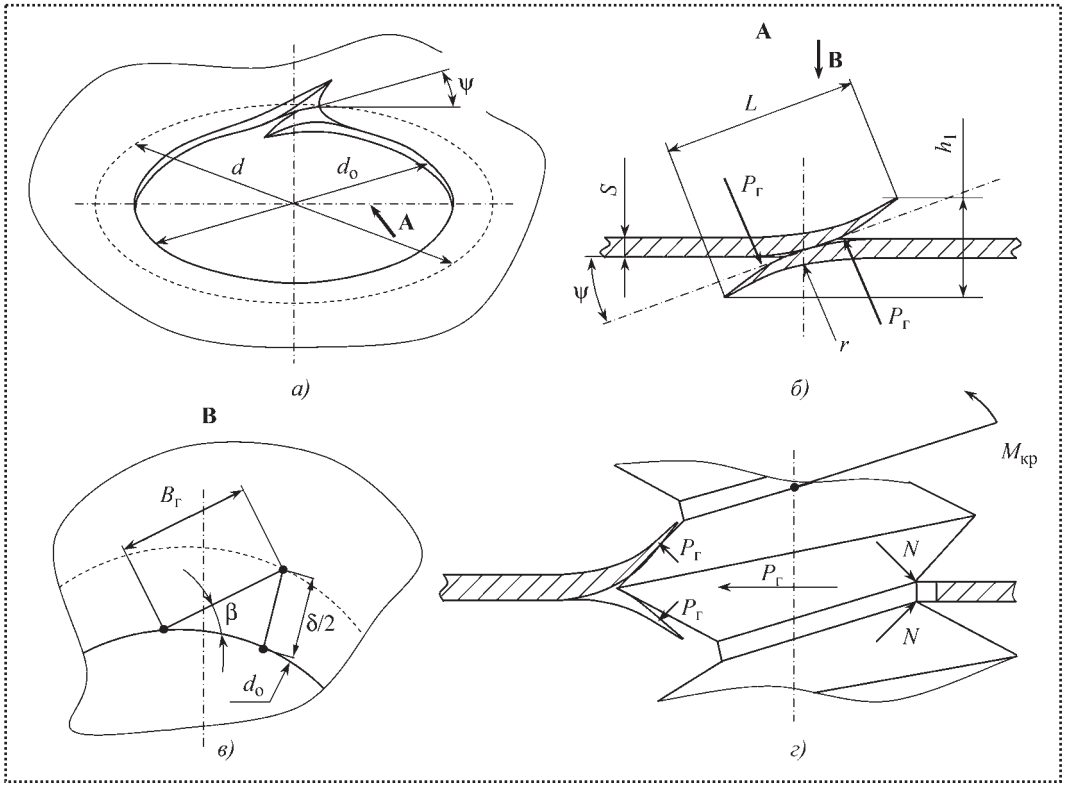


Рис. 1. Формирование профильного паза при завинчивании винта:
а – общий вид паза; *б* – вид в плоскости листа; *в* – вид в плане; *г* – схема действия сил при винтовом контакте; d_o – диаметр отверстия; δ – припуск на резьбу; h_1 – максимальное расстояние между кромками листа; β – угол наклона линии гибки к касательной образующей отверстия

Составляющие $P_г$, $P_{пр}$ определяют по формулам, применяемым в расчетах процессов обработки металлов давлением [1]:

$$P_{пр} = LS\sigma_в; \qquad P_г = k_г B_г \sigma_в S, \tag{2}$$

где L – длина паза (см. рис. 1, *б*);

S – толщина листа;

$\sigma_в$ – предел прочности материала листа;

$k_г$ – табличный коэффициент в зависимости от соотношения r/S;

r – радиус гибки;

$B_г$ – ширина гибки.

Введем определенные геометрические соотношения, соответствующие схемам на рис. 1:

$$L = S/\mathrm{tg}\psi; \qquad B_г = \delta/(2\sin\beta), \tag{3}$$

где β – угол наклона линии гибки к касательной образующей отверстия;

δ – припуск на резьбу.

С учетом данных соотношений силы N и $P_{пр}$ будут равны

$$N = \frac{2P_г}{\sin(\alpha/2)} + P_{пр} = \frac{2k_г B_г S\sigma_в}{\sin(\alpha/2)} + \frac{S^2}{\mathrm{tg}\psi}\sigma_в;$$

$$P_{пр} = LS\sigma_в = \frac{S^2}{\mathrm{tg}\psi}\sigma_в,$$

где α – угол профиля резьбы.

После соответствующих преобразований формула (1) примет вид

$$P_\tau = S\sigma_в\left(\left\{\left[2k_г B_г\left(\cos\psi + \frac{1}{\sin(\alpha/2)}\right)\right] + \frac{S}{\mathrm{tg}\psi}\right\}f + Lf_п\right). \tag{4}$$

Последнее выражение дает возможность определить величину крутящего момента профилеобразования.

Сборка пакета разнородных листовых материалов

В условиях производства часто возникают ситуации, когда необходимо произвести сборку пакета листов из разнородных материалов, например "*металл–пластмасса–металл*". Диаметр отверстий под резьбу в верхних листах равен диаметру в нижних листах, и винт при сборке начинает внедрятся в верхний лист. При завинчивании винтов в такой пакет возникают следующие ситуации.

1. При соотношении толщины листа к шагу резьбы $S/P \le 1{,}5$ пакет расклинивается по резьбо-

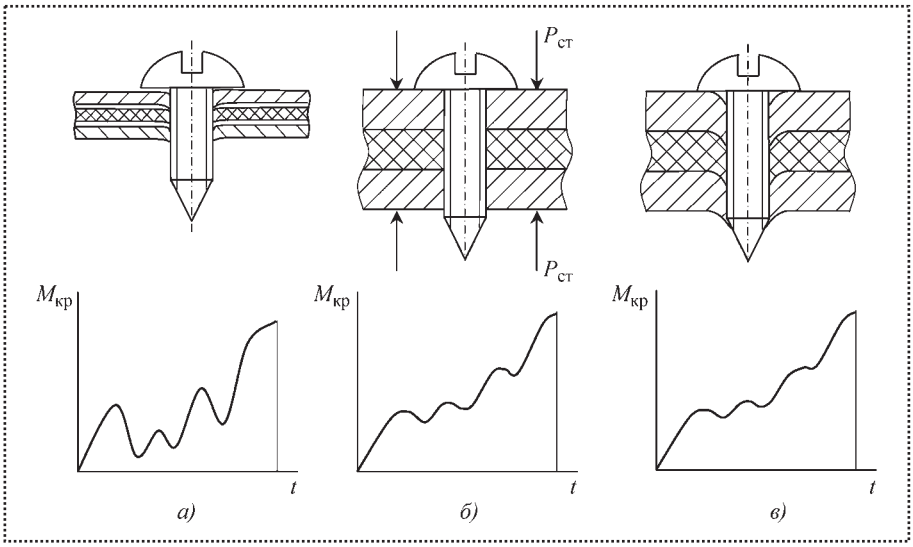


Рис. 2. Сборка пакета разнородных листовых материалов "металл–пластмасса–металл":
а – $S/P \le 1{,}5$; *б* – $S/P > 1{,}5$ с предварительной стяжкой пакета; *в* – $S/P > 1{,}5$ без предварительной стяжки; S – толщина листа; P – шаг резьбы

вым виткам. В этом случае не помогает даже предварительная стяжка пакета, поскольку при прорыве резьбового уса происходит отгибание лепестков и увеличение зазора между листами (рис. 2, *а*).

2. При толщине листа более шага резьбы ($S/P > 1{,}5$) сборка аналогична сборке в сплошной корпус из слоистого материала.

При прохождении различных слоев значения крутящего момента изменяются в зависимости от свойств материала (см. рис. 2, *б*). Для фиксации пакета во время сборки необходимо использовать дополнительные приспособления, обеспечивающие силу стягивания пакета $P_{ст}$.

Несколько отличается сборка пластичных материалов. Отгибание резьбового уса в этом случае менее выражено и эффект расклинивания пакета меньше. Для повышения несущей способности соединения отверстие под крепежный элемент не сверлят, а пробивают, при этом происходит развальцовка гнезда и дополнительное скрепление пакета (см. рис. 2, *в*).

Сила затяжки соединения

Затяжка формирует неподвижное соединение. При этом должны выполняться следующие условия, обеспечивающие неподвижность стыка соединяемых листов:

$$k_{зп} P_{з.р} f n = P_с; \qquad [P_з] > P_з > P_{з.р}, \tag{5}$$

где $P_з$ – действующая сила затяжки;

n – количество винтов в группе;

$P_с$ – сдвигающая сила;

$P_{з.р}$ – расчетная сила затяжки;

$k_{зп}$ – коэффициент запаса;

$[P_з]$ – предельная сила затяжки.

Распределение контактных напряжений в резьбовом соединении от действия силы затяжки подчиняется закону, близкому к параболическому. На основе дифференциального уравнения равновесия элемента линейно-упругого контактного слоя И.А. Биргером [2] решена задача о контактных напряжениях в стыке фланцев. Частное решение данного уравнения достаточно трудоемко: требует применения табличных функций А.Н. Крылова и выполнения многочисленных условий. Использование методики [2] для инженерных расчетов затруднительно. Поэтому прибегнем к некоторым упрощениям, аппроксимировав закон распределения контактных напряжений формой

$$z = \sigma_з - a(x^2 + y^2),$$

где x, y, z – координатная система винта (рис. 3);

a – коэффициент соотношения интенсивности и размеров контактной площадки:

$$a = -\frac{z - \sigma_з}{R^2};$$

R – текущее значение радиуса контактной площадки.

При $z = 0$

$$a = \frac{\sigma_з}{R^2}.$$

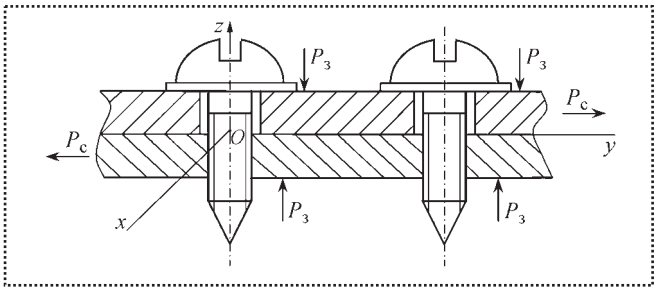


Рис. 3. Схема затянутого соединения

Определим объем параболоида контактных напряжений

$$V = 4\iint_D (\sigma - ax^2 - ay^2)dxdy, \qquad (6)$$

где D – область интегрирования на плоскости xOy;

σ – нормальные напряжения, действующие внутри параболоида контактных напряжений.

Для решения уравнения (6) перейдем к полярным координатам

$$x = R\cos\varphi;$$
$$y = R\sin\varphi,$$

где φ – угловая координата в полярной системе, и заменим произведение $dxdy$ на $Rd\varphi dR$.

После данной замены получим

$$V = 4\iint_D (\sigma - aR^2)RdydR = 4\int_0^{\pi/2} d\varphi \int_0^{R_\sigma} (\sigma R - aR^3)dR =$$
$$= 4\int_0^{\pi/2} dy\left(\frac{\sigma R^2}{2} - \frac{aR^4}{4}\right)\Bigg|_0^{\sqrt{\alpha^3/a}} = \pi\frac{\sigma_з^2}{2a}, \qquad (7)$$

где $R_\sigma = \sqrt{\frac{\sigma_з}{a}}$ – радиус контактной площадки.

Предположим, что напряжения силы затяжки распределяются равномерно в виде контактных напряжений радиусом R_σ и высотой $\sigma_р$ (рис. 4).

Тогда

$$P_з = \sigma_р \pi R_\sigma^2,$$

а объем цилиндра равен этой же величине.

Приравняем V к выражению (7) и решим полученное соотношение относительно значения контактных напряжений равномерного закона:

$$\sigma_р = 0{,}5\sigma_з.$$

Это соответствует силе затяжки

$$P_з = \frac{\pi}{2}\sigma_з R_\sigma^2 = \frac{\pi}{2}\frac{\sigma_з^2}{a}.$$

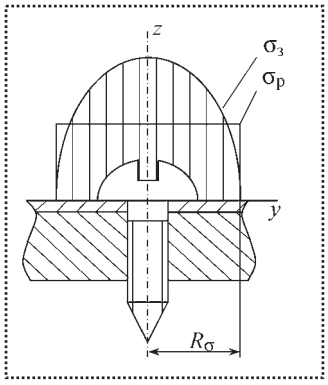


Рис. 4. Схема распределения контактных напряжений затяжки

Расчетная сила затяжки в соответствии с условием (5) должна определяться в виде

$$P_{з.р} > \frac{P_с}{k_{з.п} f n}. \qquad (8)$$

Тогда максимальное значение контактного напряжения, действующее по оси винта при $x = y = 0$, будет равно

$$\sigma_з > \sqrt{\frac{2aP_с}{\pi k_з f n}}. \qquad (9)$$

Предельная сила затяжки соответствует условию срыва резьбы (профиля) в отверстии. Это произойдет, когда резьба винта произведет отбортовку нижнего листа в области диаметров ($d - d_о$). Сила отбортовки при этом равна [1]

$$P_о = 1{,}1\pi S\sigma_в(d - d_о) = [P_з].$$

Таким образом, второе условие системы (5) примет вид

$$P_о > P_з > \frac{P_с}{k_з f n}.$$

С помощью нормированных значений сил затяжки $P_{з.н}$ [3] определим значения нормированных напряжений $\sigma_{з.н}$ и, следовательно, максимальные сдвиговые силы $P_с^{max}$, которые будут сдерживаться затяжкой листов:

$$\sigma_{з.н} = \sqrt{\frac{2aP_{з.н}}{\pi}};$$
$$P_с^{max} \le k_з f n P_{з.н}. \qquad (10)$$

Последнее выражение является условием устойчивости соединения.

Вывод

Представленное исследование сборки пакета из листового материала позволяет определить необходимые условия для устойчивости получаемого резьбового соединения. Рассмотрена сборка пакета из разнородных материалов разной толщины. Разработанная методика дает возможность определить основные параметры профилеобразования, крутящие моменты и необходимую силу затяжки.

Библиографический список

1. **Краткий справочник металлиста** / под ред. А.Е. Древаля, Е.А. Скороходова. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 960 с.

2. **Биргер И.А., Иосилевич Г.Б.** Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.

3. **Иосилевич Г.Б., Строганов П.Б., Шарловский Ю.В.** Затяжка и стопорение резьбовых соединений. Справочник. М.: Машиностроение, 1985. 224 с.

4. **Петриков В.Г., Власов А.П.** Прогрессивные крепежные изделия. М.: Машиностроение, 1991. 256 с.

УДК 621.922.079

Д.Л. Скуратов, *канд. техн. наук (Самарский государственный аэрокосмический университет),*
С.Ю. Сидоров *(Самарский завод "Прогресс" ГНП РКЦ "ЦСКБ-Прогресс")*

Прогрессивные конструкции и способ сборки шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью

Представлены прогрессивные конструкции сборных шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью. Показана перспективность их использования при шлифовании ответственных деталей авиационной техники. Разработан способ сборки абразивных кругов, обеспечивающий надежное закрепление всех сегментов, а также равномерное распределение силы затяжки основного и прижимного фланцев планшайбы по всем сегментам круга.

Progressive constructions of broken cutting surface emery-wheels are presented. The outlook of their use in aircraft technical equipment essential details grinding is shown. The assembling method of emery-wheels ensuring reliable attaching of all segments and the even distribution of main and cuddle chuck flanges tight activity to all emery-wheel segments are elaborated.

Ключевые слова: сборный шлифовальный круг, прерывистая режущая поверхность, авиационная техника, сборка.

Key words: emery-wheel, broken cutting surface, aircraft technical equipment, assembly.

Изготовление ответственных деталей изделий для авиационной техники сопровождается, как правило, жестким контролем за соблюдением условий обработки и, в частности, режимов резания на операциях шлифования. Снижение рабочей скорости вращения круга не должно превышать 10...15 % (связано с его износом) от значений, указанных в операционной карте технологического процесса [1].

Учитывая, что частота вращения шпинделя шлифовальной бабки у большей части станков не регулируется или в лучшем случае имеет несколько частот вращения [2], на операциях шлифования таких деталей стандартные абразивные круги применять нецелесообразно, так как коэффициент полезного использования (КПИ) кругов существенно уменьшается. Например, у шлифовальных кругов формы ПП КПИ из-за ограничения, накладываемого на возможное изменение рабочей скорости вращения шлифовального круга, снижается с 75...95 % до 30...40 %. Реально же этот коэффициент еще меньше, так как согласно данным работы [3] для различных видов шлифования износ рабочей части круга при правке составляет 50...95 %.

Общеизвестно, что разрушение быстровращающихся дисков с центральным отверстием, к которым относятся и шлифовальные круги, начинается с поверхности посадочного отверстия, так как именно там возникают максимальные окружные напряжения. Значения радиальных и окружных напряжений, возникающих во вращающемся шлифовальном круге, можно определить по формулам [4]

$$\sigma_r = \frac{\gamma\omega^2}{8g}(3+\mu)\left(b^2 + a^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2} - r^2\right);$$

$$\sigma_t = \frac{\gamma\omega^2}{8g}(3+\mu)\left(b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1+3\mu}{3+\mu} r^2\right),$$

где ω – угловая скорость шлифовального круга, $с^{-1}$;

γ – удельный вес круга, $Н/м^3$;

g – ускорение свободного падения, $м/с^2$;

μ – коэффициент Пуассона;

b – значение радиуса периферийной поверхности круга, м;

a – значение радиуса посадочного отверстия круга, м;

r – текущее значение радиуса круга, м.

Такой характер распределения рабочих напряжений во вращающемся круге не позволяет вести обработку заготовок стандартными абразивными кругами, изготовленными, например, на широко распространенной борсодержащей связке К5, со скоростями резания свыше 50 м/с без упрочнения их посадочного отверстия. А, как известно, высо-

коскоростное шлифование является одним из самых перспективных направлений, позволяющим обеспечить значительное повышение производительности обработки.

В отличие от серийных шлифовальных кругов сборные шлифовальные круги, состоящие из металлической планшайбы и абразивных сегментов [5], на той же связке К5 позволяют вести обработку при скоростях резания, равных 150...170 м/с.

Положительный эффект от использования сборных шлифовальных кругов может быть усилен, если их изготовить с прерывистой режущей поверхностью.

Прогрессивные конструкции сборных шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью представлены на рис. 1. Круги подобной конструкции позволяют вести обработку на режимах, в среднем в 1,5...3 раза более производительных по сравнению со сборными кругами со сплошной рабочей поверхностью при обеспечении технических требований на операцию.

Результаты исследования сил резания и среднеконтактной температуры показали, что при одинаковых условиях обработки шлифовальные круги с прерывистой режущей поверхностью обеспечивают снижение этих функциональных параметров соответственно в 1,2...1,6 раза и 1,2...3 раза по сравнению с кругами со сплошной рабочей поверхностью [1].

Такой высокий положительный эффект от использования шлифовальных кругов с прерывистой режущей поверхностью обусловлен уменьшением времени действия теплового импульса за счет прерывания теплового потока, поступающего в деталь, образованием "заборной поверхности" у прерывистых кругов (см. рис. 1, *а*) [6] и внесением смазки в зону резания смазочно-охлаждающими сегментами (рис. 1, *б*).

Смазывающе-охлаждающие сегменты сборных кругов наиболее часто изготавливают из смесей на основе графита марок ГЛ-I, ГЛ-II или дисульфида молибдена (MoS_2).

Как показала практика, ***использование сборных кругов с прерывистой режущей поверхностью при шлифовании ответственных деталей изделий для авиационной техники позволяет существенно повысить коэффициент использования инструмента и производительность обработки при обеспечении технических требований на операцию.***

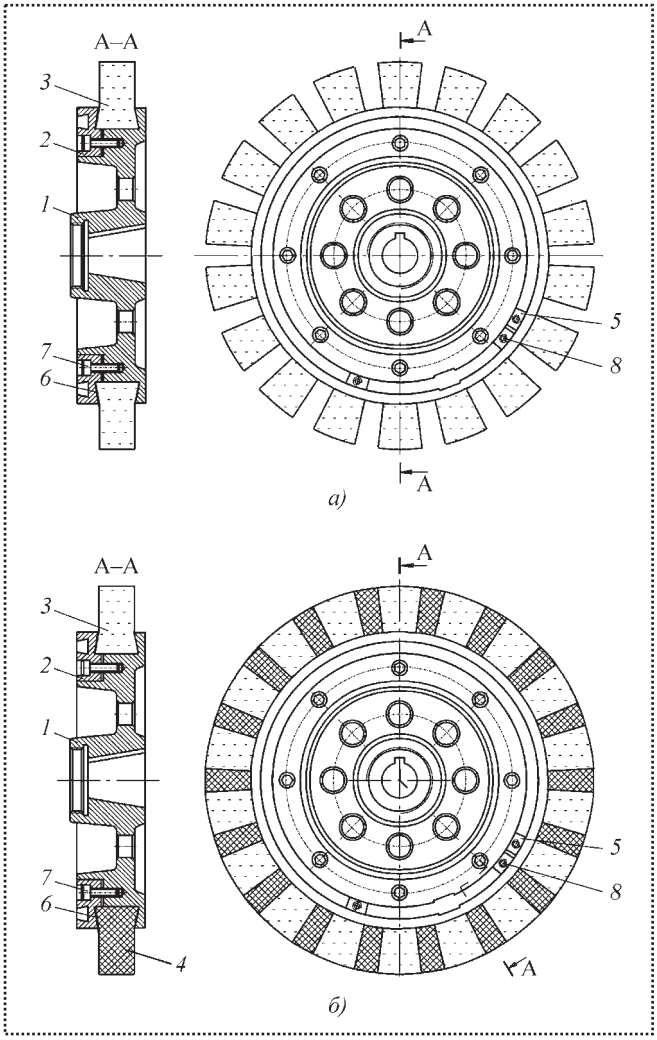


Рис. 1. Сборные шлифовальные круги с прерывистой режущей поверхностью:
а – прерывистый; *б* – композиционный; *1* – основной фланец; *2* – прижимной фланец; *3* – абразивный сегмент; *4* – смазывающе-охлаждающий сегмент; *5* – балансировочный сухарик; *6* – картонная прокладка; *7* – винт; *8* – винт фиксации балансировочного сухарика

Кроме того, такая конструкция кругов обеспечивает разгрузку абразивных и смазывающе-охлаждающих сегментов от окружных растягивающих напряжений. При этом каждый сегмент круга испытывает радиальные напряжения сжатия в "замковой" части под фланцами и напряжения растяжения в наружной рабочей части [4], а исследованиями установлено, что предел прочности на сжатие абразивных [5] и смазывающе-охлаждающих [7] сегментов в 6...8 раз больше, чем при растяжении, т.е. такая конструкция кругов обеспечивает повышение их прочности по сравнению со стан-

дартными кругами и, следовательно, позволяет использовать при больших скоростях резания на более производительных режимах.

В целях повышения производительности сборки кругов и надежности закрепления каждого из сегментов был разработан новый способ сборки предлагаемого абразивного инструмента [8]. Суть его заключается в следующем.

На установочную коническую поверхность основного фланца *1* (см. рис. 1) планшайбы через прокладку укладываются абразивные *3* или абразивные и смазывающе-охлаждающие *4* сегменты, имеющие ответные конические поверхности. На вышеуказанные сегменты опять же через прокладку накладывают прижимной фланец *2* планшайбы. После чего основной и прижимной фланцы равномерно стягивают винтами *7* так, чтобы хотя бы один сегмент был зафиксирован по установочным поверхностям. Затем, путем вращения круга, к каждому сегменту прикладывают радиальную центробежную силу.

Частота вращения круга должна быть такой, чтобы центробежная сила, действующая на каждый сегмент, в 20...25 раз превышала его массу. Под действием радиальной силы незафиксированные сегменты перемещаются до момента осуществления устойчивой фиксации по установочным поверхностям, после чего воздействие радиальной силы прекращается.

При этом продолжительность вращения круга не должна превышать 30...60 с. Для того чтобы после снятия радиальной силы обеспечить гарантированное удержание сегментов в зафиксированном положении, угол конуса α установочных поверхностей сегментов и зажимных поверхностей основного и прижимного фланцев планшайбы выполняют таким, чтобы обеспечить самоторможение сегментов (рис. 2), т.е.

$$\alpha \le 90 - \mathrm{arctg}\, f,$$

где f – коэффициент трения покоя абразивного или смазывающе-охлаждающего сегмента по материалу прокладки (например, коэффициенты трения покоя абразивного и смазывающе-охлаждающего на основе графита сегментов по картону равны соответственно 0,64 и 0,28).

Затем основной и прижимной фланцы планшайбы стягивают окончательно, тем самым обеспечивая гарантированное закрепление сегментов. Возможность окончательной затяжки обеспечивают наличием гарантированного зазора Δ между соответствующими торцовыми поверхностями фланцев.

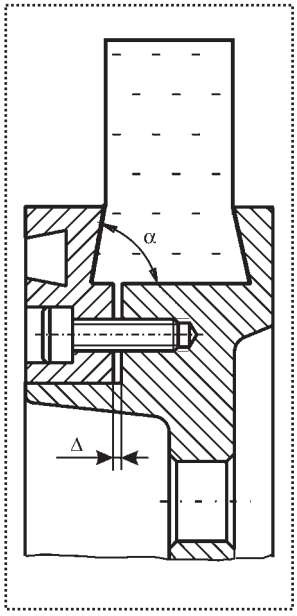


Рис. 2. "Замковая" часть сборного шлифовального круга

Сборные шлифовальные круги, собранные по вышеизложенной методике, успешно выдерживают испытания на прочность по ГОСТ 12.3.028–82 и применяются в серийных технологических процессах изготовления ответственных деталей изделий авиационной техники.

Вывод

Предлагаемый способ сборки шлифовального круга за счет одновременного и надежного закрепления всех сегментов и равномерного распределения силы затяжки основного и прижимного фланцев планшайбы по всем сегментам круга обеспечивает повышение производительности процесса сборки круга и улучшение его эксплуатационных характеристик.

Библиографический список

1. **Скуратов Д.Л., Трусов В.Н.** Обработка металлов шлифованием и методы ее интенсификации: Учеб. пособие. Самара: Изд-во СГАУ, 1997. 88 с.

2. **Кащук В.А., Верещагин А.Б.** Справочник шлифовщика. М.: Машиностроение, 1988. 480 с.

3. **Ящерицын П.И., Жалнерович Е.А.** Шлифование металлов. Минск: Изд-во "Беларусь", 1970. 464 с.

4. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1970. 544 с.

5. **Филимонов Л.Н.** Высокоскоростное шлифование. Л.: Машиностроение, 1979. 248 с.

6. **Якимов А.В.** Оптимизация процесса шлифования. М.: Машиностроение, 1975. 176 с.

7. **Скуратов Д.Л., Белоусов В.Л.** К вопросу выбора конструкции составных композиционных кругов // Повышение эффективности использования режущих инструментов и качества поверхности при обработке авиационных материалов: сб. науч. тр.; Куйбышев. авиац. ин-т, 1987. С. 83–86.

8. **А.с.** 1379065 СССР МКИ^3 B24D 18/00. Способ сборки абразивного круга / С.Ю. Сидоров, М.Е. Маркушин (СССР). № 4077080/31–08; Заявл. 09.06.86; Опубл. 07.03.88. Бюл. № 9 // Открытия. Изобретения. 1988. № 12.

М.В. Вартанов, *д-р техн. наук,* ***А.И. Власов*** *(МГТУ "МАМИ")*

Влияние толщины клеевой прослойки на прочность соединений кузовных панелей автомобилей

Рассмотрена возможность применения клея при сборке кузовных панелей автомобиля ЗИЛ. Проанализированы результаты прочностных испытаний клеевых соединений.

The opportunity of application of glues is considered at assembly body panels of car ZIL. Results adhesion tests of glutinous connections are analysed.

Ключевые слова: клей, клеевое соединение, сборка, кузовная панель, прочностные испытания.

Key words: glue, glue assembly, assembly, body panel, strength test.

При сборке кузова автомобиля в настоящее время используют достаточно надежный метод соединения сваркой, но, к сожалению, его можно использовать не всегда. Например, соединение окрашенных панелей кузова этим методом невозможно. С этой проблемой столкнулись на АМО "ЗИЛ" при производстве автобусов и фургонов ЗИЛ.

Заднюю панель кабины (рис. 1) устанавливают на окончательных этапах сборки кузова автомобиля уже окрашенной. На заводе решили эту проблему, применив болтовое и заклепочное соединения. Перегородка по боковым поверхностям кабины крепится болтами, а в верхней и нижней частях – при помощи заклепок с интервалом в 100 мм.

Возможен иной способ соединения – менее трудоемкий, чем заклепывание, – это соединение при помощи клея. При склеивании распределение нагрузок происходит по всей длине клеевого шва, тогда как заклепки являются концентраторами напряжений (рис. 2).

Кроме того, клеевое соединение достаточно надежно, герметично, имеет высокий уровень антикоррозионной защиты и повышенное сопротивление к воздействию вибрационных нагрузок, а также обеспечивает звукоизоляцию. Перераспределе-

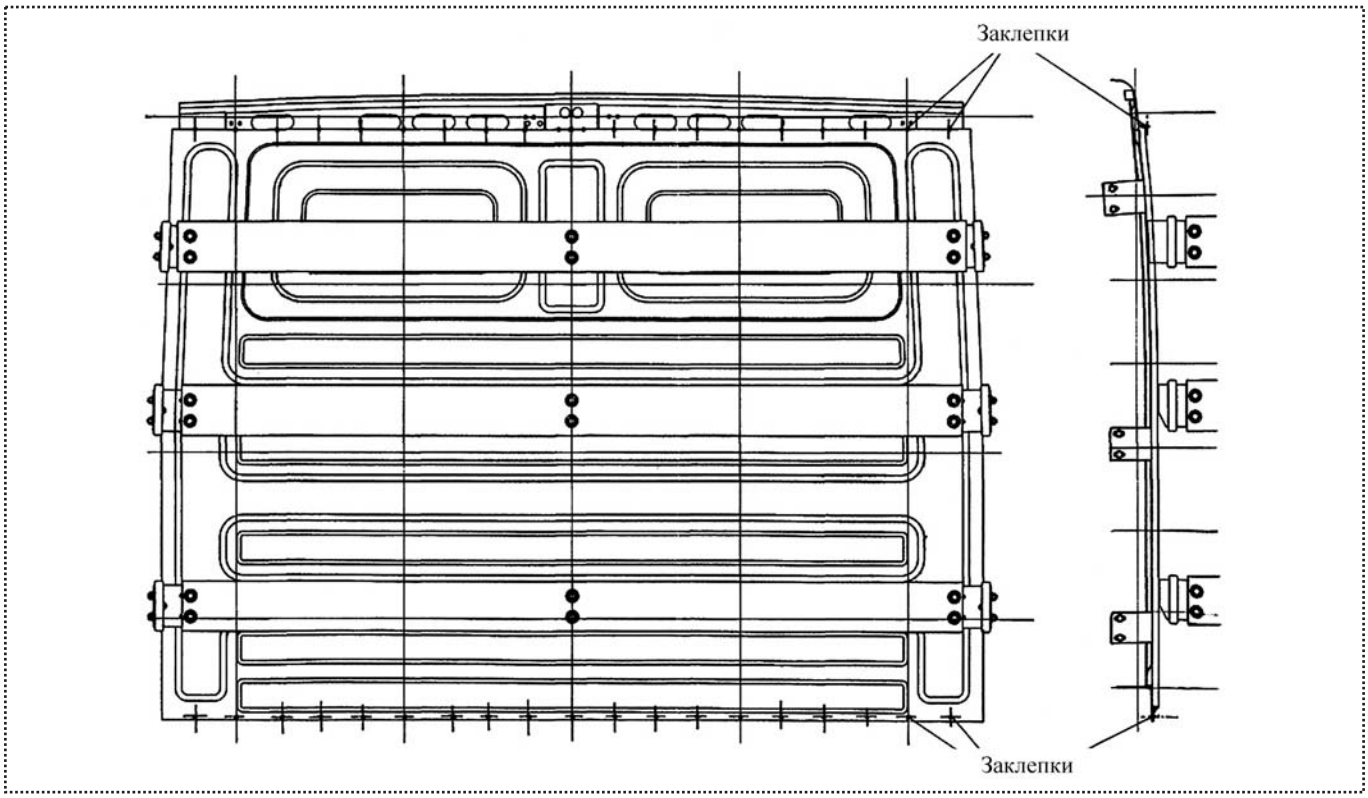


Рис. 1. Задняя панель кабины

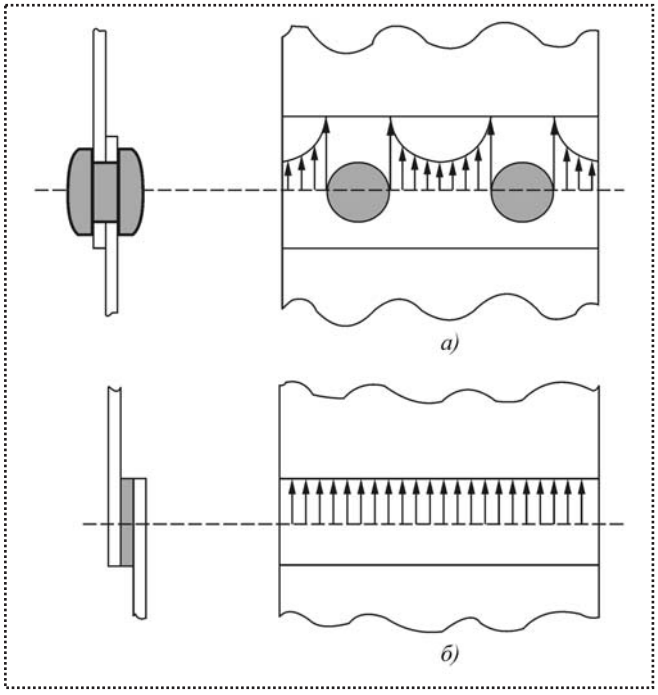


Рис. 2. Распределение напряжений:
а – при заклепочном соединении; *б* – при клеевом соединении

ние напряжений в клеевом шве обеспечивает повышение жесткости конструкции. Склеивание дешевле других видов соединений, универсально и просто в применении [1, 2].

После проведенного анализа имеющегося на рынке клея выбрали две марки: *"Terostat 9220"* и *ВК-27*.

Клей-герметик на основе MS-полимеров "Terostat 9220" уже довольно давно применяют в автомобилестроении как для наружных, так и для внутренних соединений.

Универсальный эпоксидно-каучуковый клей ВК-27, в свою очередь, зарекомендовал себя в авиационной промышленности. Оба этих клея схожи по назначению и области применения, но заявленная производителями прочность различна и выше у клея ВК-27 [3].

Характеристики этих клеев приведены в таблице [4, 5].

Данные, приведенные в таблице, получены при склеивании стальных образцов, поверхность под склеивание которых была подготовлена в соответствии с технологиями, рекомендованными изготовителями клеев. Согласно технологии для клея ВК-27 поверхность необходимо зачистить и обезжирить бензином и ацетоном. К сожалению, это не приемлемо для окрашенной поверхности, а также с точки зрения техники безопасности и экологических норм. Исходя из этого, для подготовки поверхности под склеивание применили несодержащий ацетон очиститель-обезжириватель "Förch", который используют при ремонте автомобилей.

Величины пределов прочности при сдвиге

Марка клея	Предел прочности $\tau_{сд}$, МПа	
	заявленный производителем	полученный при эксперименте*
"Terostat 9220"	4,4	3,3
ВК-27	22,5	17,1

*Эксперимент проведен по ГОСТ 14759–69.

Были проведены испытания склеенных клеем ВК-27 окрашенных образцов с применением очистителя поверхности "Förch" в соответствии с ГОСТ 14759 –69, по итогам которых было установлено: предел прочности при сдвиге составляет 7,9 МПа, что значительно меньше, чем при склеивании обычных (неокрашенных) стальных образцов, но больше предела прочности, чем у клея "Terostat 9220". Окрашенные разорванные образцы, склеенные клеем ВК-27, показаны на рис. 3. Если внимательно рассмотреть место разрушения клеевого шва, то можно видеть, что разрушение происходит по лакокрасочному покрытию, следовательно, *адгезия клея выше адгезии лакокрасочного покрытия*.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что клей ВК-27 подходит для склеивания окрашенных кузовных панелей.

Так как клей будут применять для сборки кузовных панелей, то он должен противостоять коррозии. Склеенные окрашенные и обычные стальные образцы для испытаний были выдержаны в климатической камере в течение 100 ч при температуре 60 °С и относительной влажности 95 %. Проверка их прочности на сдвиг показала, что у окрашенных образцов прочность на 0,43 МПа выше, чем у образцов, которые не подвергались выдержке в климатической камере. Предел прочности у стальных

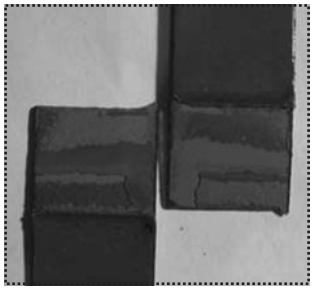


Рис. 3. Вид разорванных окрашенных образцов, склеенных ВК-27

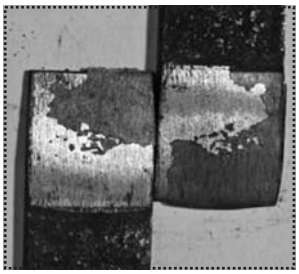


Рис. 4. Вид разорванных образцов, склеенных ВК-27, после испытания на коррозионную стойкость

образцов изменялся в пределах 3,59...8,0 МПа. Кроме того, металл под клеевым слоем почти не подвергся коррозии, это видно на рис. 4.

Результаты испытаний предела прочности на сдвиг $\tau_{сд}$ клеевых соединений приведены на рис. 5. На их основании можно сделать вывод, что *клей ВК-27 имеет достаточно высокую прочность при склеивании окрашенных деталей и не теряет ее, если склеиваемые стальные образцы защищены от коррозии.*

При создании технологии сборки необходимо учитывать, что задняя панель кабины фургона ЗИЛ – достаточно крупногабаритная деталь со значительными погрешностями формы. Это при склеивании приведет к разной толщине клеевого слоя, следовательно, необходимо определить, как скажется разнотолщинность на прочности клеевого соединения.

С учетом заводской конструкции задней панели кабины может быть реализовано клеевое соединение внахлест. Лучше всего работу этого клеевого соединения отражают испытания на сдвиг. Прочность при сдвиге определялась по ГОСТ 14759–69. Для проведения экспериментов специально были

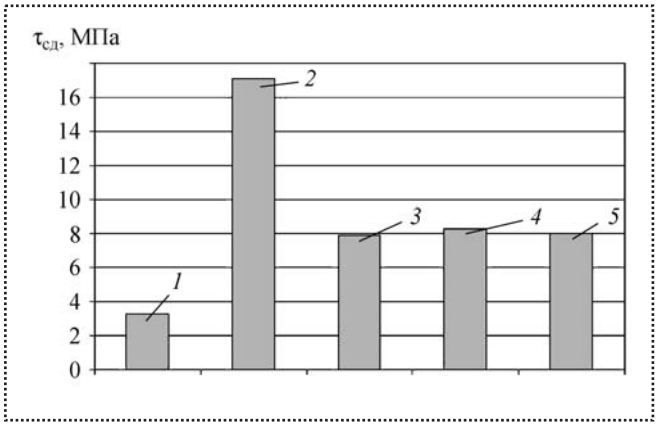


Рис. 5. Результаты испытаний предела прочности $\tau_{сд}$ на сдвиг клея "Terostat 9220" и клея ВК-27 при различных условиях испытаний:

1 – клей "Terostat 9220", стальные образцы; *2* – клей ВК-27, стальные образцы; *3* – клей ВК-27, окрашенные образцы; *4* – клей ВК-27, испытания на коррозионную стойкость стальных образцов; *5* – клей ВК-27, испытания на коррозионную стойкость окрашенных образцов

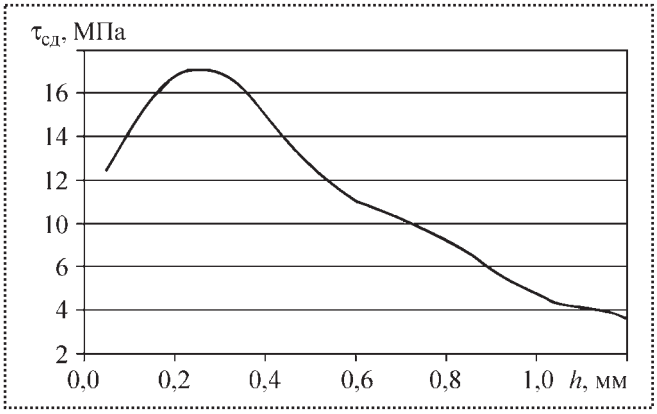


Рис. 6. Зависимость предела прочности $\tau_{сд}$ на сдвиг от толщины *h* клеевой прослойки клея ВК-27

подготовлены образцы с разными толщинами клеевого шва. С учетом общепринятой практики рассматривался диапазон толщин 0,05...1,20 мм с шагом 0,05 мм. Результаты эксперимента приведены на рис. 6.

Из графика видна зависимость прочности при сдвиге от толщины клеевой прослойки и видно, что наибольшая прочность получается при толщине $h_{кл}$ = 0,15...0,35 мм, а с ее увеличением прочность падает до 5...6 МПа, что соответствует нагрузке 69,98 кг·см^2 площади склеенной поверхности (6,998 МПа). Поскольку вся площадь клеевого шва задней панели кабины составляет около 188 см^2, то клеевое соединение должно выдержать нагрузку в 13 155 кг. Завод-изготовитель проверяет данную перегородку исходя из условия 200 кг на 1 т полезного груза. При грузоподъемности автомобиля в 3 т расчетная сила составляет 600 кг.

Вывод

При различных условиях испытаний прочность клея ВК-27 выше прочности клея "Terostat 9220", а его механические свойства позволяют применять его при сборке кузовных панелей. Полученные результаты необходимы для создания технологии сборки кузовов с использованием клеев. Дальнейшие исследования будут направлены на разработку технологического обеспечения качества клеевых соединений на производстве.

Библиографический список

1. **Вильнав Ж.-Ж.** Клеевые соединения. М.: Техносфера, 2007. 384 с.

2. **Аронович Д.А., Варламов В.П., Войтович и др.;** под общ. ред. Г.В. Малышевой. Склеивание в машиностроении. Справочник в 2-х т. М.: Наука и технологии, 2005. 544 с.

3. **Петрова А.П.** Клеящие материалы. Справочник. М.: ЗАО "Редакция журнала "Каучук и резина" (К и Р), 2002. 196 с.

4. **www.loctite.com.** Информация по продукту Terostat 9220.

5. **Клей** ВК-27 ПИ 1.2А.145-99.

УДК 621.757

Д.С. Воркуев, *канд. техн. наук (ОАО "Завод им. В.А. Дегтярёва", г. Ковров)*

Предельные режимы работы механизмов свободного хода храпового типа с учетом ударов

Обоснован выбор предельных режимов работы механизмов свободного хода с учетом упругих и упруго-пластических деформаций при ударах собачки о зуб храпового колеса.

The utmost permissible operation conditions for the ratchet-gear overrunning clutch have been substantiated taking into account the elastic and plasto-elastic deformation at the moment of the detent impact against the ratchet wheel tooth.

Ключевые слова: многошпиндельный гайковерт, храповой механизм, удар, упругая деформация, упруго-пластическая деформация, предельные режимы работы.

Key words: multi-spindle nut wrench, ratchet mechanism, impact shock, elastic deformation, plasto-elastic deformation, utmost permissible operation conditions.

В многошпиндельных гайковертах нового класса, кинематические схемы которых описаны в работах [1, 2], используются механизмы свободного хода храпового типа. Причем на ведущей обойме (рис. 1) расположена подпружиненная собачка и в момент начала взаимодействия ее с храповым колесом происходит удар. Только при одной сборке многошпиндельным гайковертом группового резьбового соединения собачка многократно соударяется с зубьями храпового колеса.

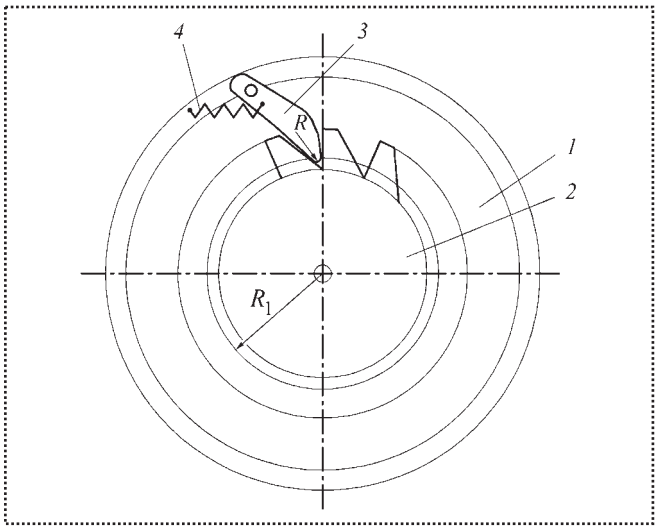


Рис. 1. Взаимодействие собачки с зубом храпового колеса механизма свободного хода:
1 – обойма; *2* – храповое колесо; *3* – собачка; *4* – пружина; *R* – радиус скругления рабочей поверхности собачки; R_1 – радиус взаимодействия собачки с зубом храпового колеса

Найдем предельные режимы работы механизмов свободного хода при упругой деформации соударяемых поверхностей собачки и зуба храпового колеса.

Случай упругой деформации соударяемых поверхностей собачки и зуба храпового колеса

Считаем, что после удара (см. рис. 1) храповое колесо *2* не повернется вокруг своей оси, т.е. имеем дело с ударом поджатой пружиной *4* собачки *3*, расположенной на обойме *1*, о жестко закрепленную плоскость зуба храпового колеса.

Воспользуемся теоремой об изменении главного вектора момента количества движения механической системы (кинетического момента) и после интегрирования в проекции на ось вращения ведущей обоймы с собачкой механизма свободного хода имеем

$$J_{o_2}(\omega_1 - \omega_0) = \Sigma M^{l}_{jo_2} t,$$

где J_{o_2} – приведенный момент инерции вращающихся элементов гайковерта от ротора электродвигателя до ведущей обоймы механизма свободного хода с собачкой к ее оси;

ω_1 – угловая скорость системы после удара;

ω_0 – угловая скорость системы до удара;

$\Sigma M^{l}_{jo_2}$ – проекция моментов внешних сил на ось вращения ведущей обоймы с собачкой;

t – время взаимодействия системы.

Рассмотрим случай удара. При этом учитывают только момент силы удара, а остальными моментами сил из-за их малости пренебрегают.

Тогда предыдущее выражение запишется:

$$J_{o_2}(\omega_1 - \omega_0) = -M^{уд} t,$$

где $M^{уд}$ – момент силы удара относительно ведущей обоймы механизма свободного хода.

Учитывая, что угловая скорость после удара равна нулю ($\omega_1 = 0$), имеем

$$J_{o_2}\omega_0 = M^{уд}t. \quad (1)$$

В выражении (1) неизвестны $M^{уд}$ и t.

Следует заметить, что даже при точных экспериментах время удара будет отличаться от действительного в разы.

Выразим правую часть выражения (1) через параметры системы и физико-механические свойства материалов соударяемых деталей – собачки и храпового колеса.

Считаем, что работы при ударе собачки о плоскость зуба храпового колеса и при медленном их сжатии равны при одинаковой упругой деформации:

$$A = M^{уд}\varphi^{уд} = M_{сж}\varphi_{сж}, \quad (2)$$

где $\varphi^{уд}$ – угол поворота собачки относительно оси ведущей обоймы при упругих деформациях;

$M_{сж}$ – момент от силы сжатия собачки зуба храпового колеса относительно оси обоймы *1*;

$\varphi_{сж}$ – угол поворота обоймы с собачкой относительно оси вращения при медленном нагружении.

Радиус скругления рабочей поверхности собачки R, следовательно, происходит взаимодействие цилиндрической поверхности с плоскостью зуба храпового колеса.

Выражение Герца для расчета радиуса пятна контакта [3] запишется:

$$b = 1{,}522\sqrt{\frac{qR}{E}}, \quad (3)$$

где q – нагрузка на единицу длины полосы контакта;

E – приведенный модуль упругости материалов контактируемых тел (считаем, что собачка и храповое колесо выполнены из одного материала).

Наибольшее давление в средней линии полосы сдавливания цилиндра с плоскостью [3]:

$$P_o = \frac{2}{\pi}\frac{q}{b}.$$

Согласно [3] имеем

$$P_o = 0{,}418\sqrt{\frac{qE}{R}}. \quad (4)$$

Сжимающая сила [3]:

$$F_{сж} = \frac{2}{3}\pi abP_o, \quad (5)$$

где a – длина взаимодействия цилиндра с плоскостью;

$F_{сж}$ – предельная сила сжатия контактирующих тел при их упругой деформации.

Учитывая, что рассматривается случай упругих деформаций контактирующих тел:

$$F_{сж} = [G_{сж}]S_{сж}, \quad (6)$$

где $[G_{сж}]$ – допустимое напряжение при сжатии;

$S_{сж}$ – площадь сжатия (контакта) цилиндра и плоскости:

$$S_{сж} = 2ba. \quad (7)$$

Подставим в (5) выражения (6), (4) и (3), возведем в квадрат и найдем q:

$$q = \frac{9R[G_{сж}]^2}{0{,}418^2\pi^2E}. \quad (8)$$

Подставим q в выражение (3), найдем радиус пятна контакта цилиндра на плоскости:

$$b = 11\frac{[G_{сж}]R}{\pi E}. \quad (9)$$

Найдем составляющие члены выражения (2).

Считаем, что в процессе упругой деформации соударяемых тел происходит равнозамедленное движение. Тогда

$$\varphi^{уд} = \omega_{ср}t = \frac{\omega_0}{2}t, \quad (10)$$

где $\omega_{ср} = \frac{\omega_1 + \omega_0}{2} = \frac{\omega_0}{2}$ – средняя угловая скорость движения ведущей обоймы в момент удара, так как $\omega_1 = 0$.

Момент медленного сжатия собачки и плоскости храпового колеса запишется:

$$M_{сж} = F_{сж}R_1.$$

С учетом (6) и (7) предыдущее выражение примет вид:

$$M_{сж} = [G_{сж}]2baR_1. \quad (11)$$

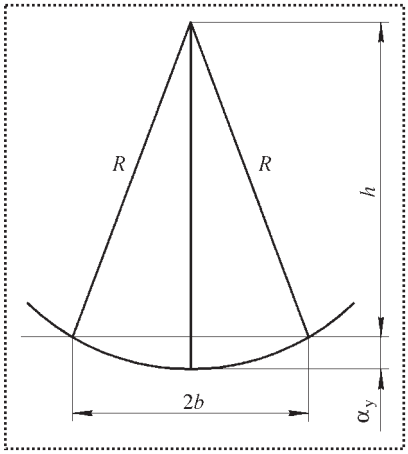


Рис. 2. Схема контакта собачки с плоскостью зуба храпового колеса

Угол поворота ведущей обоймы при сжатии найдем через длину поворота конца собачки:

$$\varphi_{сж} = \frac{\alpha_y}{R_1}, \qquad (12)$$

где α_y – величина упругой деформации взаимодействующих тел при медленном нагружении, равная длине дуги.

Величину упругой деформации найдем из геометрии взаимодействующих тел (рис. 2).

Найдем h:

$$h = \sqrt{R^2 - b^2}.$$

Тогда

$$\alpha_y = R - h = R - \sqrt{R^2 - b^2}. \qquad (13)$$

Подставим в выражение (2) его составляющие (10)–(13) и найдем из полученного выражения правую часть управления (1):

$$M^{уд} t = \frac{4[G_{сж}]ba(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{\omega_0}.$$

Полученное выражение подставим в (1) и найдем предельную угловую скорость вращения ведущей обоймы механизма свободного хода:

$$\omega_0 < \sqrt{\frac{4[G_{сж}]ba(R - \sqrt{R^2 - b^2})}{J_{o_2}}}.$$

С учетом выражения для расчета величины полуоси пятна контакта (9) получим предельную угловую скорость ведущей обоймы механизма свободного хода, при которой при ударе собачки о зуб храпового колеса в месте контакта возникали бы только упругие деформации:

$$\omega_0 < 2[G_{сж}]\sqrt{\frac{11aR}{\pi E J_{o_2}}\left(R - \sqrt{R^2 - \frac{11^2[G_{сж}]^2 R^2}{\pi^2 E^2}}\right)}. \qquad (14)$$

Следовательно, найдена предельная угловая скорость вращения ведущей обоймы механизма свободного хода в зависимости от параметров гайковертов, физико-механических свойств материалов собачки и храпового колеса, при которых при ударе возникали бы только упругие деформации.

Найдем значения частот n вращения ведущей обоймы механизма свободного хода для реальных конструкций гайковертов.

Данные для расчетов угловой скорости и частоты вращения ведущих обойм механизмов свободного хода приведены в таблице.

Как видно из расчетов частоты, вращения ведущих обойм механизмов свободного хода малы. Увеличить их можно только за счет радиуса R (в расчетах радиус имеет достаточно большое значение), а также за счет ширины храповых колес, увеличивать толщину которых не рационально.

Поэтому рассмотрим случай взаимодействия собачки с зубом храпового колеса, при котором возникают упругопластические деформации.

Угловая скорость и частота вращения ведущих обойм механизмов свободного хода

Длина взаимодействия с плоскостью, a, мм	J_{o_2}, Н·м² (Н·см²)	$[G_{сж}]$, Па (Н/см²)	E, МПа (Н/см²)	ω (с⁻¹)		n (мин⁻¹)	
				R, мм		R, мм	
				1	2	1	2
5	$5\cdot10^{-7}$ (0,005)	160 (16000)	$2\cdot10^5$ ($2\cdot10^7$)	0,106	0,198	1,015	1,890
10				0,150	0,281	1,436	2,68

Случай упругопластической деформации соударяемых поверхностей собачки и зуба храпового колеса

Из теоретического и экспериментального исследования дробеструйного упрочнения поверхностей известно, что при первом ударе глубина деформации поверхности составляет порядка 90 % от окончательной при множественных ударах. Погрешность в 10 % при доказательствах можно считать незначительной.

Для нового доказательства исходные управления (1) и (2) справедливы. Справедливы и выражения (6), (7), (10), (11).

Найдем составляющие выражения (2) с учетом упругопластической деформации.

Сближение контактирующих тел при их упругопластической деформации согласно [3] запишется:

$$\alpha = h + \alpha_{у}; \qquad (15)$$

$$h = \frac{P - P_1}{2\pi R_{пр} \mathrm{HD}},$$

где P – полная нагрузка;

P_1 – предварительная нагрузка до момента появления пластической деформации;

$R_{пр}$ – приведенный радиус кривизны контактирующих поверхностей;

HD – пластическая твердость:

$$\mathrm{HD} = \frac{88300}{130 - \mathrm{HRB}},$$

где HRB – твердость по шкале B Роквелла, МПа.

На практике величина h может быть равна одной трети допуска на размер:

$$h = \frac{1}{3}\delta,$$

где δ – допуск на размер до деформации поверхности.

Тогда выражение (12) запишется в виде

$$\varphi_{сж} = \frac{\alpha}{R_1} = \frac{h + \alpha_{у}}{R_1}.$$

Согласно расчетам (см. таблицу) величина упругого сближения (деформации) колеблется в диапазоне $\alpha_{у}$ = 6...15 мкм. Эта величина по сравнению с третью допуска на размер мала и ею можно пренебречь.

Тогда из рис. 2 радиус пятна контакта равен

$$b = \sqrt{R^2 - (R - h)^2}.$$

Подставим составляющие (10), (11) с учетом, что $\alpha_{у} \approx 0$ в выражение (2) и выделим из него правую часть уравнения (1):

$$M^{уд} t = \frac{4[G_{сж}]ah\sqrt{R^2 - (R-h)^2}}{\omega_0}.$$

Подставим последнее выражение в уравнение (1) и найдем предельную угловую скорость вращения ведущей обоймы механизма свободного хода при заданном значении пластической деформации:

$$\omega_0 < 2\sqrt{\frac{[G_{сж}]a\delta\sqrt{R^2 - \left(R - \frac{\delta}{3}\right)^2}}{3J_{o_2}}}. \qquad (16)$$

Рассчитаем предельные значения угловых скоростей и частот вращения ведущей обоймы механизма свободного хода при следующих параметрах: J_{o_2} = 0,005 Н·см^2; $[G_{сж}]$ = 1600 Н/см^2; a = 0,5 см.

При R = 0,05 см, δ = 0,001 см: ω < 10,2 с$^{-1}$, n < < 97,7 мин$^{-1}$.

При R = 0,1 см, δ = 0,002 см: ω < 14,57 с$^{-1}$, n < < 139,2 мин$^{-1}$.

Эти значения угловых скоростей приемлемы для механизмов свободного хода, используемых в многошпиндельных гайковертах нового класса.

Выводы

1. Разработан подход решения практических задач для случаев удара, в основу которого положено равенство работ силы удара и силы медленного сжатия при одинаковых деформациях.

2. Получены математические зависимости предельных угловых скоростей вращения ведущих обойм механизмов свободного хода от параметров самого механизма, гайковерта и физико-механических свойств деталей при их упругом и упругопластическом ударе.

Библиографический список

1. **Патент** № 2288834. Многошпиндельный гайковерт. Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, Ю.Н. Матросова. Опубл.: 10.09.2007. Бюл. № 25.

2. **Житников Б.Ю., Симаков А.Л.** Методология разработки универсальных, высокоточных, многошпиндельных завинчивающих устройств нового класса: Монография / под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: ГОУ ВПО "КГТА", 2002. 216 с.

3. **Демидов С.П.** Теория упругости: Учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 432 с.

В.И. Трусов, Т.М. Кузинова, И.В. Гармашова *(ООО НПП "НОТЕХ" С.-Петербург)*

Новые технологии "вре́менной" противокоррозионной защиты*

Представлены не требующие "грязной" расконсервации новые технологии с участием ингибиторов атмосферной коррозии ФМТ, НМ-1, ВНХ-Л-20, а также химического преобразователя ржавчины НОТЕХ-К.

New technologies includes corrosion inhibitors "FMT", "N-M-1", "VNH-L-20" and chemical transducer of rust "NOTEH-K" are introduced. These technologies are not requires a "dirty" depreservation.

Ключевые слова: противокоррозионная защита, экологическая безопасность, ингибитор.

Key words: anticorrosive protection, environmental safety, inhibitor.

В последние годы большое значение приобрела проблема экологической безопасности вре́менной противокоррозионной защиты. Нитрит натрия, нитрит дициклогексиламина (НДА) – это чрезвычайно- и высокотоксичные вещества. В традиционных схемах защиты металлоизделий на период хранения и транспортировки используют консервационные масла и смазки, удаление которых представляет экологически грязный процесс с токсичными сточными водами, содержащими нефтепродукты (основа консерванта) и производные аминов (ингибитор коррозии). Получатели металлопродукции справедливо требуют от поставщиков исключения масел в качестве основы консервационных составов. Необходима ликвидация самой операции расконсервации и использование менее опасных ингибирующих присадок. Рассмотрим примеры решения некоторых практических задач.

В качестве основы консерванта вместо масла используют воду. Компания Katerpillar-Tosno (Ленинградская область) для защиты на период транспортировки производимых металлоизделий использует водную эмульсию ингибитора ФМТ. Вода безопасна, а ингибитор, вещество 4-го класса опасности, изготовлен на основе производных растительного сырья: жирных кислот таллового масла, модифицированных комплексными соединениями хлорофилла. Ингибитор в воде нерастворим, поэтому сначала создают щелочную среду. В 1 %-ный раствор карбоната натрия вводят 1–2 % ФМТ. Эмульсию распылением в окрасочной камере наносят на изделия, которые после выхода из окрасочной камеры подвергают горячей сушке для быстрого удаления воды (конвейерная линия). На поверхностях образуется невидимый слой ингибиторов, расконсервация не требуется, допустимы даже сварочные работы.

Идеальный вариант защиты – состояние полного постоянного погружения конструкции в консервационный раствор. В этом случае на металле постоянно находится защитный адсорбционный слой ингибиторов. Коррозия полностью подавлена и исключена весь период эксплуатации конструкции. Тот же ингибитор ФМТ в виде 1%-ного раствора в дизельном топливе внедрен для защиты линз двойного дна нефтехранилищ. Во время эксплуатации линза находится в состоянии заполнения консервантом. Двойное дно защищено от коррозии, а окружающая среда – от проливов нефти.

В составе ФМТ имеются медные комплексы хлорофилла. Введение меди в молекулу хлорофилла должно приводить к появлению фунгистатической активности, что важно для подавления анаэробной грибной коррозии. О фунгистатическом действии судили по задержке роста культуры основных видов плесневых грибов в сравнении с контрольным методом серийных разведений. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

* По материалам 10-й Международной научно-практической конференции "Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки". С.-Петербург. 15–18 апреля 2008.

1. Фунгистатическое действие ФМТ

Тесткультура	Интенсивность роста грибов при консервации ингибитора, %						
	2	1	0,5	0,25	0,125	0,06	Контроль
Penicillum chrysogenum	2	2	2	2	2	2	4
Aspergillus niger	2	2	4	4	4	4	4
Trichoderma viride	2	2	4	4	4	4	4
Cladosporium resinae	2	2	2	4	4	4	4
Chaetomium globosum	2	2	2	4	4	4	4

Примечание. Для контрольных образцов без ингибитора интенсивность роста грибов – 4.
Обозначения: 4 – типичный рост культуры; 2 – отсутствие спорообразования.

Фунгистатическое действие, хотя и умеренное, проявляется в задержке спорообразования в рабочем интервале концентраций ингибитора. Выявленный эффект необычен, поскольку не сопровождается проявлениями токсичности ФМТ. Ингибиторы-фунгистатики, – как правило, производные аминов – характеризуются значительно более высокой степенью токсичности.

Выбирают зимние сорта дизельного топлива для эксплуатации в условиях низких наружных температур. Растворенный ингибитор работает на небольшое понижение температуры замерзания дизтоплива. Преимущества ФМТ перед аналогами связаны с его *экологической безопасностью,* а также с *идеальной совместимостью с основой.* Приготовление консервационного состава заключается во вливании 10 кг ингибитора ФМТ в тонну дизтоплива, прямо на месте применения в полевых условиях. Линза перед заполнением консервантом должна быть сухой и чистой.

Сложная противоречивая задача совмещения гидроиспытаний емкостного оборудования с консервацией. После удаления воды активно развиваются коррозионные процессы, а уж внешний вид емкости совсем нетоварный. Широко применялось введение в воду нитрита натрия – в среднем 1 %. Такой водный раствор не просто опасен, а смертельно опасен, в нем 7000 ПДК! Нитрит может быть заменен на 1–3 % ингибитора НМ-1 (3-й класс опасности). Он представляет собой соль циклогексиламина и синтетических жирных кислот фракции C_{10}–C_{16}. Это ближайший аналог известного ранее ингибитора М-1. В технологии должна быть предусмотрена резервная емкость хранения технологического раствора и периодически этот раствор корректируется по концентрации НМ-1. Ингибированная вода не плесневеет, допускает многократное использование. В случае применения эмульсии малотоксичного ФМТ возможен слив воды без ее локальной очистки. Для достижения длительных сроков консервации свыше полугода необходимо осушение воздуха внутри емкости и комбинация с летучими ингибиторами.

Задача защиты от вторичной коррозии после абразивоструйной очистки. Поверхность идеально очищена, а затем до покраски она успела прокорродировать. Органические ингибиторы коррозии исключены: как правило, они создают слой, несовместимый с грунтом, потребуется обязательная расконсервация. На срок защиты до месяца без видимых продуктов коррозии в мягких условиях задача успешно решается обработкой химическим преобразователем ржавчины НОТЕХ, сочетающим холодное фосфатирование с пассивацией анодным ингибитором коррозии. НОТЕХ не создает слоя как грунт, поэтому совместим с разными типами ЛКМ. Если все же проявятся отдельные очаги, их следует дополнительно обработать непосредственно перед покраской.

При нанесении лакокрасочных и других типов покрытий подготовка поверхности имеет принципиальное значение. Лучшая абразивоструйная очистка до степени Sa2,5 (стандарт ИСО 8501–1) в ряде случаев (ремонтные работы) просто недостижима, приходится упрощать, комбинировать с другими методами.

Обработка металлической поверхности НОТЕХ – один из лучших химических способов подготовки металла под окраску, при котором мелкокристаллическая структура фосфатной пленки способствует хорошей впитываемости лакокрасочных материалов и тем самым улучшает их адгезию.

Возможна обработка и ржавых, и чистых поверхностей без последующей отмывки водой.

НОТЕХ изготовляют в виде концентрата НОТЕХ-К, что позволяет варьировать рабочую концентрацию в зависимости от толщины и типа ржавчины. Экспериментально обоснован принципиально важный результат по снижению скорости подпленочной коррозии на примере влияния обработки стали составом НОТЕХ на защитные свойства грунтовки ЭФ-065 в соляном по ГОСТ 9.401–91, метод Б.

Толщина грунтовочного покрытия составила 27...35 мкм. На лицевой стороне каждого образца детали крестообразный надрез покрытия. После чего образцы устанавливали на испытания в камеру. Адгезия грунтовки ЭФ-065 как по чистому металлу, так и обработанному составом НОТЕХ до и после испытаний – 1 балл. Значение распространения коррозии от надреза определяли после размягчения и осторожного удаления покрытия с образца, не повреждая зону, прилегающую к надрезу. Расчет проводили с учетом максимального поражения через 10 мм линии надреза. Область крестообразного надреза в расчет не принимали. Полученные данные представлены в табл. 2.

Как видно из представленных данных, значение распространения коррозии от надреза на образцах, обработанных Нотех, существенно ниже. Состав обладает выраженным пассивирующим действием, он снижает скорость коррозии стали под слоем лакокрасочной грунтовки и улучшает тем самым качество системы покрытия в целом, продлевает срок ее службы.

Теоретический предел толщины слоя преобразуемой ржавчины не превышает 80...100 мкм. При ремонте конструкций с такими слоями плотносцепленной ржавчины или еще более толстыми пластами наиболее эффективны комбинированные схемы очистки, когда поверхность предварительно обрабатывают НОТЕХ для облегчения последующей абразивоструйной или механической очистки. После этого окончательно поверхность опять доводят НОТЕХ для локализации коррозии в язвах и труднодоступных зонах.

2. Средние величины распространения коррозии $Wd_{ср}$ от надреза

Подготовка поверхности	№ образца	$Wd_{ср}$, мм
Пескоструйная до степени Sa 2,5	01	0,218
	02	0,062
	03	0,125
Пескоструйная до степени Sa 2,5 и обработанная составом НОТЕХ	1	0,05
	2	0,062
	3	0,062

Примечание. Покрытие – грунтовка ЭФ-0,65, один слой.

В условиях непрерывного перемещения НОТЕХ по металлической поверхности (прокачка, погружение в ванну с барботажем, с ультразвуком и т.п.) образуются растворимые кислые фосфаты железа, т.е. превалирует процесс очистки поверхности от ржавчины и окалины.

Такая способность НОТЕХ дает основание для его применения без подогрева при снятии окалины перед термодиффузионным цинкованием деталей, очистке мостового крепежа, проведении стадии кислочения в сложных процедурах предпусковой очистки трубопроводных систем и оборудования взамен органических кислот (лимонной, щавелевой), в процессах дезактивации. Так, при запуске новой линии производства полипропилена на ООО "Ставролен" (г. Буденовск) с помощью НОТЕХ в сжатые сроки были отмыты более 30 км труб!

Существенное увеличение срока защиты до года и более достигают комбинацией легкой пассивации НОТЕХ или водным ФМТ с летучим ингибитором. В настоящее время восстановлено производство универсального летучего ингибитора коррозии ВНХ-Л-20, представляющего собой продукт конденсации морфолина и бензальдегида (диморфолинфенилметан).

ВНХ-Л-20 является известным эффективным ингибитором для защиты черных и цветных металлов. Известно его применение в виде порошка, ингибированной бумаги и на пористых носителях. Обеспечивает защиту изделий сроком до 10 лет при надежном изолирующем экране, может полноценно заменить НДА. Важнейшая характеристика летучего ингибитора – его давление p насыщенного пара. У ВНХ-Л-20 сразу два механизма парообразования. Он сублимируется в вакууме, выше температуры $T = 150$ °С подвергается необратимой деструкции. По данным калориметрии испарения

$$\lg p = (12{,}7 \pm 7{,}2) - (4500 \pm 2530)/T.$$

При 25 °С давление сублимации p_c = = $4{,}4 \cdot 10^{-5}$ гПа, что ниже, чем у эталона НДА – 10^{-4} гПа. Опыт натурных испытаний ВНХ-Л-20 показывает, что во влажной атмосфере он обладает значительно более высокой летучестью в сравнении с НДА. Причина несоответствия состоит в том, что класс производных морфолина чрезвычайно легко гидролизуется с выделением в газовую фазу легколетучих исходных компонентов. С увеличением влажности воздуха растет агрессивность среды, и количество молекул ингибитора, поступающих в газовую фазу, тоже растет.

Начато производство упаковочной полиэтиленовой пленки "Коррнет" с ВНХ-Л-20, а также принципиально новых полиэтиленовых изделий-вкладышей "Гранулин" произвольной формы.

Антикорропил – гранулы размером 2...3 мм и диаметром 1...2 мм, предназначены для консервации мелких деталей: болтов, винтов, гаек, гвоздей хранящихся или транспортируемых в таре (коробки, ящики). "Опилки" подсыпаются в тару.

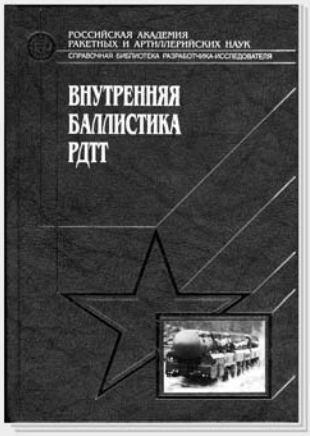
Антикорронить – полимерные нитки для защиты от атмосферной коррозии агрегатов и двигателей автомобильной и другой техники при консервации на открытом воздухе, с укрывным материалом при складском хранении или при транспортировке.

Антикорростержень – стержни, шомпол и т.п. для консервации металлоизделий с отверстиями и полостями (трубы, оружейные стволы). Стержень устанавливают в отверстие и закрывают заглушкой. Расконсервация состоит в снятии заглушки и удалении стержня.

Концентрация ВНХ-Л-20 в таких изделиях на порядок выше содержания в пленке, при этом обеспечена равномерная диффузия газообразных молекул ингибитора из всего объема изделия в течение длительного времени. Цикл консервация – расконсервация может повторяться неоднократно, это изделия многоразового применения, они не рвутся как пленки, требования к барьерным материалам снижены. Речь идет о самой удобной, совершенной и гигиеничной форме применения летучего ингибитора коррозии. По совокупности выявленных свойств такая защитная система не имеет аналогов.

Вывод

Представленные новые технологии временной противокоррозионной защиты в полной мере соответствуют современным требованиям защиты окружающей среды и безопасности работ для человека. Все ингибирующие материалы поставляются Научно-производственным предприятием "НОТЕХ" в С.-Петербурге. Одновременно предприятие оказывает необходимую научно-методическую помощь в освоении технологий применительно к конкретным условиям предприятия.



Внутренняя баллистика РДТТ / РАРАН / А.В. Алиев и др.; под ред. акад. РАН А.М. Липанова и акад. РАРАН Ю.М. Милехина; редкол. серии: В.В.Панов (пред.) и др. (Справ. б-ка разработчика-исследователя). 2007. – 504 с., тв. пер., 70×100 1/16

ISBN 978-5-217-03397-3

Цена с НДС 500 руб.

Рассматриваются внутрикамерные процессы в твердотопливных ракетных двигателях различных конструкций. Изложены методы расчета внутрибаллистических параметров, напряженно-деформированного состояния прочноскрепленных с корпусом зарядов и корпусов РДТТ. Проанализированы методы исследования процессов горения твердого топлива и экспериментальной отработки РДТТ.

Книга рассчитана на специалистов, профессиональная деятельность которых связана с отработкой РДТТ и его конструктивных узлов. Она может быть полезна аспирантам, студентам и преподавателям вузов.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел подписки, маркетинга и рекламы по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение".
Справки по тел. (499) 269-66-00.
http://www.mashin.ru

УДК 681.2–52

Ю.Н. Матросова, *канд. техн. наук,* ***Н.Г. Потапова***
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)

Методы автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов изделий перед сборкой

Разработана классификация существующих методов автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов. Выявлены основные достоинства и недостатки данных методов.

A classification of the existing techniques for computerized non-damaging control of materials has been provided. The principal advantages and weaknesses of the methods analyzed have been revealed.

Ключевые слова: автоматизированный, неразрушающий, контроль, пористость, физико-механические свойства, дефекты, акустический, вихретоковый, капиллярный, магнитный, оптический, радиографический, газодинамический.

Key words: computerized, non-damaging control, porosity, physical and mechanical properties, faults, acoustic, vortex-current, capillary, magnetic, optical, radiographic, gas-dynamic.

В настоящее время перед сборкой изделий машиностроения необходимо проводить контроль физико-механических свойств пористых материалов для исключения возможности их разрушения во время эксплуатации. Одним из параметров, характеризующих физико-механические свойства пористых материалов, таких как прочность, теплопроводность, твердость и др., является *пористость*.

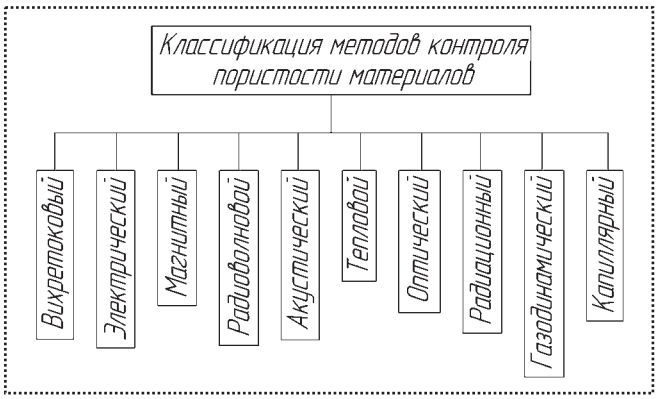


Рис. 1. Классификация методов автоматизированного НК

В результате проведенного анализа существующих методов и средств [1, 2] определения пористости материалов была разработана классификация автоматизированных средств неразрушающего контроля (НК) пористости материалов (рис. 1).

Как видно из представленной на рис. 1 классификации, все автоматизированные средства измерения пористости изделий из пористых материалов по виду рабочей среды можно подразделить на средства с газовой и жидкостной средой, ртутью, а также средствами контроля рентгенографическим, электрическим, акустическим и оптическим методами.

Акустические методы неразрушающего контроля представляют собой совокупность методов дефектоскопирования, в которых основными носителями возбуждения и информации о качестве объекта являются акустические волны. Классификация акустических методов неразрушающего контроля представлена на рис. 2.

Активные методы акустического контроля основаны на излучении и приеме упругих волн, *пассивные* – только на приеме волн, источником которых служит сам контролируемый объект.

Активные методы делят на методы прохождения, отражения, комбинированные (использующие как прохождение, так и отражение), импедансные и методы собственных частот. По частотному признаку акустические методы подразделяют на *низкочастотные* и *высокочастотные*.

Акустические методы неразрушающего контроля могут применяться для дефектоскопирования поковок, отливок, сварных соединений и деталей из различных материалов как металлов, так и неметаллов.

Данные методы хорошо поддаются автоматизации и не представляют угрозы для жизнедеятельности человека. Однако они не позволяют обеспечить достаточно высокую точность контроля материалов, имеющих сложную разветвленную структуру пор, так как возникает сложность обнаруже-

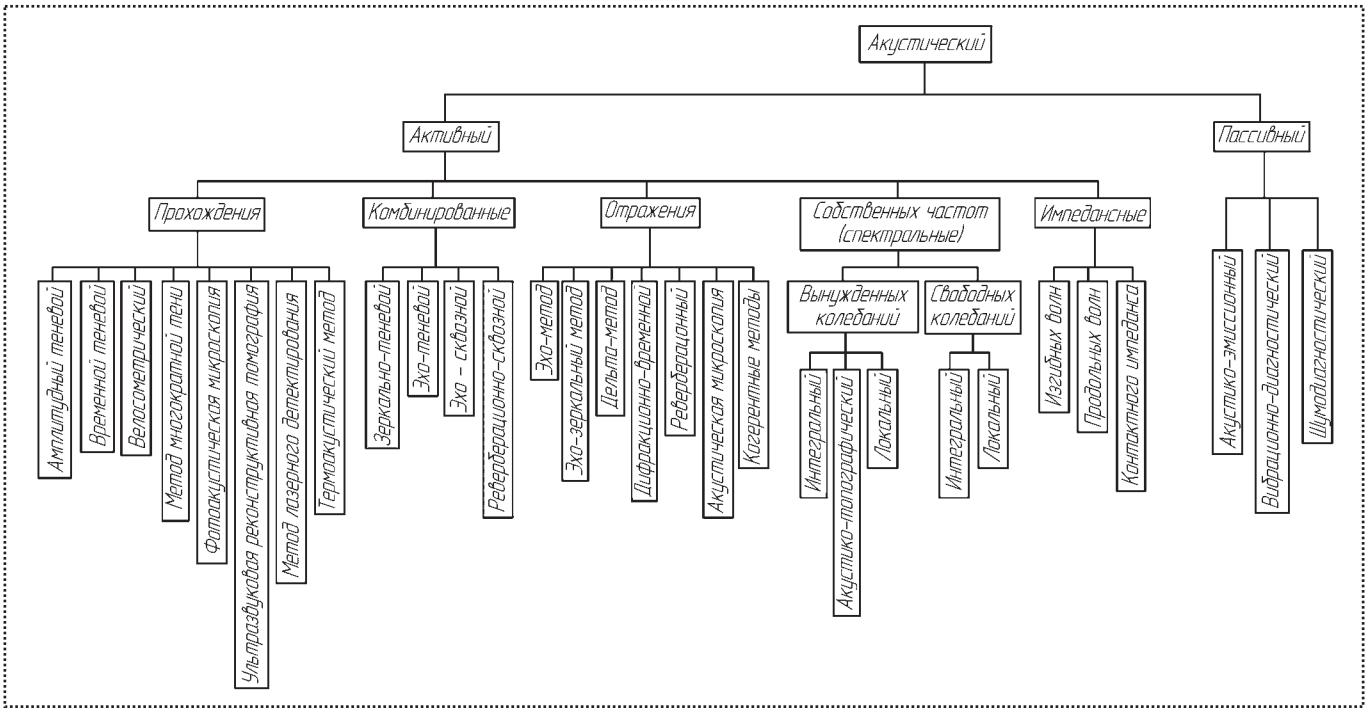


Рис. 2. Классификация акустических методов НК

ния дефектов, расположенных один над другим. Кроме этого, данные методы наиболее чувствительны на глубине 5...10 мм и предъявляют высокие требования к шероховатости поверхностей контролируемых изделий.

Вихретоковые методы (рис. 3) основаны на анализе взаимодействия внешнего электромагнитного поля с электромагнитным полем вихревых токов, наводимых возбуждающей катушкой в электропроводящем объекте контроля.

По рабочему положению относительно объекта контроля преобразователи делят на проходные, накладные и комбинированные. По способу соединения обмоток различают абсолютные и дифференциальные вихретоковые преобразователи.

На результаты измерений данными методами практически не влияют влажность, давление, загрязненность газовой среды, радиоактивные излучения, загрязнение поверхности объекта непроводящими веществами.

Преобразователи устойчивы к механическим и атмосферным воздействиям, могут работать в агрессивных средах, в широком интервале температур и давлений.

Основными *недостатками* данных методов являются малая глубина зоны контроля и возможность контроля качества только электропроводящих объектов.

Капиллярные методы (рис. 4) *неразрушающего контроля* основаны на капиллярном проникновении индикаторных жидкостей (пенетрантов) в полости поверхностных и сквозных несплошностей материала объектов контроля и регистрации образующихся индикаторных следов визуальным способом или с помощью преобразователя.

Капиллярные методы НК предназначены для обнаружения невидимых или слабовидимых невооруженным глазом поверхностных и сквозных дефектов в объектах контроля, определения их расположения, протяженности и ориентации по поверхности.

Этот вид контроля позволяет диагностировать объекты любых размеров и форм, изготовленные из черных и цветных металлов и сплавов, стекла, керамики, а также других твердых неферромагнитных материалов.

Капиллярный контроль применяют также для объектов, изготовленных из ферромагнитных материалов, если их магнитные свойства, форма, вид и месторасположение дефектов не позволяют достичь требуемой чувствительности магнитопорошковым методом, или магнитопорошковый метод

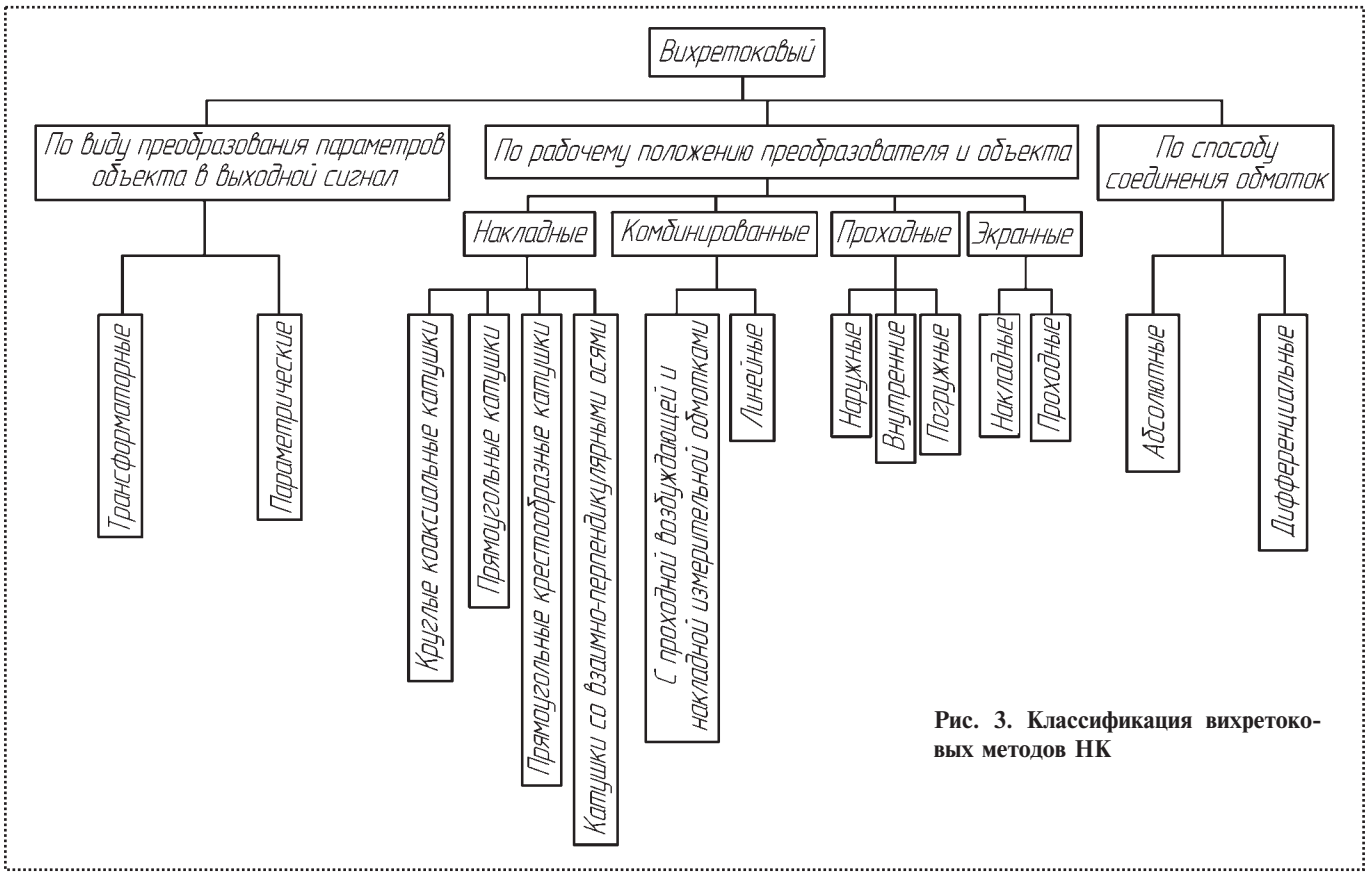


Рис. 3. Классификация вихретоковых методов НК

контроля не допускается применять по условиям эксплуатации объекта.

Капиллярные методы подразделяют на основные, использующие капиллярные явления, и комбинированные (см. рис. 4).

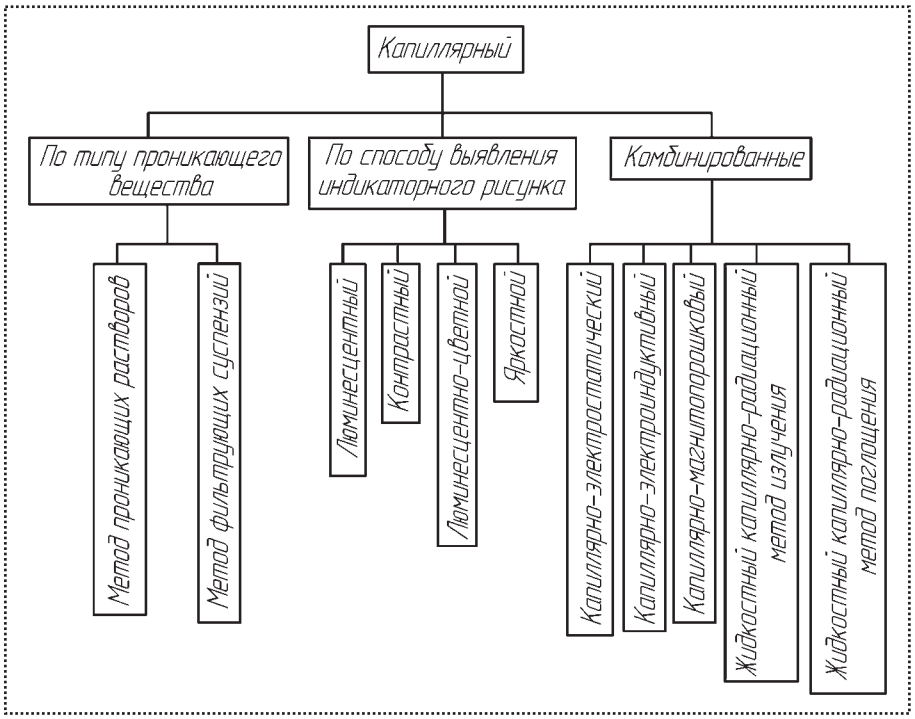


Рис. 4. Классификация капиллярных методов НК

С помощью высокочувствительных наборов для капиллярной дефектоскопии можно обнаружить поверхностные дефекты типа трещин и пор величиной до 1 мкм.

Основным *недостатком* данных методов является возможность обнаружения только поверхностных и сквозных дефектов. Кроме этого, после контроля необходима специальная очистка поверхности.

Магнитный вид неразрушающего контроля применяют в основном для контроля изделий из ферромагнитных материалов, т.е. из материалов, которые способны существенно изменять свои магнитные характеристики под воздействием внешнего магнитного

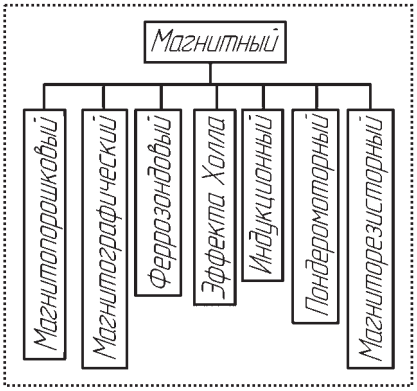


Рис. 5. Классификация магнитных методов НК

поля. При этом возможно выявление дефектов от нескольких микрометров. Классификация магнитных методов дефектоскопирования приведена на рис. 5.

Методы контроля герметичности основаны на процессе проникновения вещества через контролируемый материал. Разработаны несколько методов контроля герметичности (рис. 6). При этом контролю могут подвергаться изделия из любых материалов. Эти методы позволяют обнаружить внутренние дефекты. Но для проведения данного контроля необходим обязательный контакт контролирующего вещества и изделия, а во время контроля необходимы специальная подготовка и очистка изделия от индикаторного вещества.

Оптические методы неразрушающего контроля основаны на взаимодействии электромагнитного излучения оптического диапазона с веществом. Классификация оптических методов представлена на рис. 7. При данных методах контроля возможно определение геометрических параметров дефектов и дефектов размером 1 мкм.

К *недостаткам* данных методов можно отнести сложность определения многослойных дефектов, возможность возникновения вредных бликов, зависимость результата от правильного выбора освещения при контроле.

Радиографические методы радиационного НК основаны на преобразовании радиационного изображения контролируемого объекта в радиографиче-

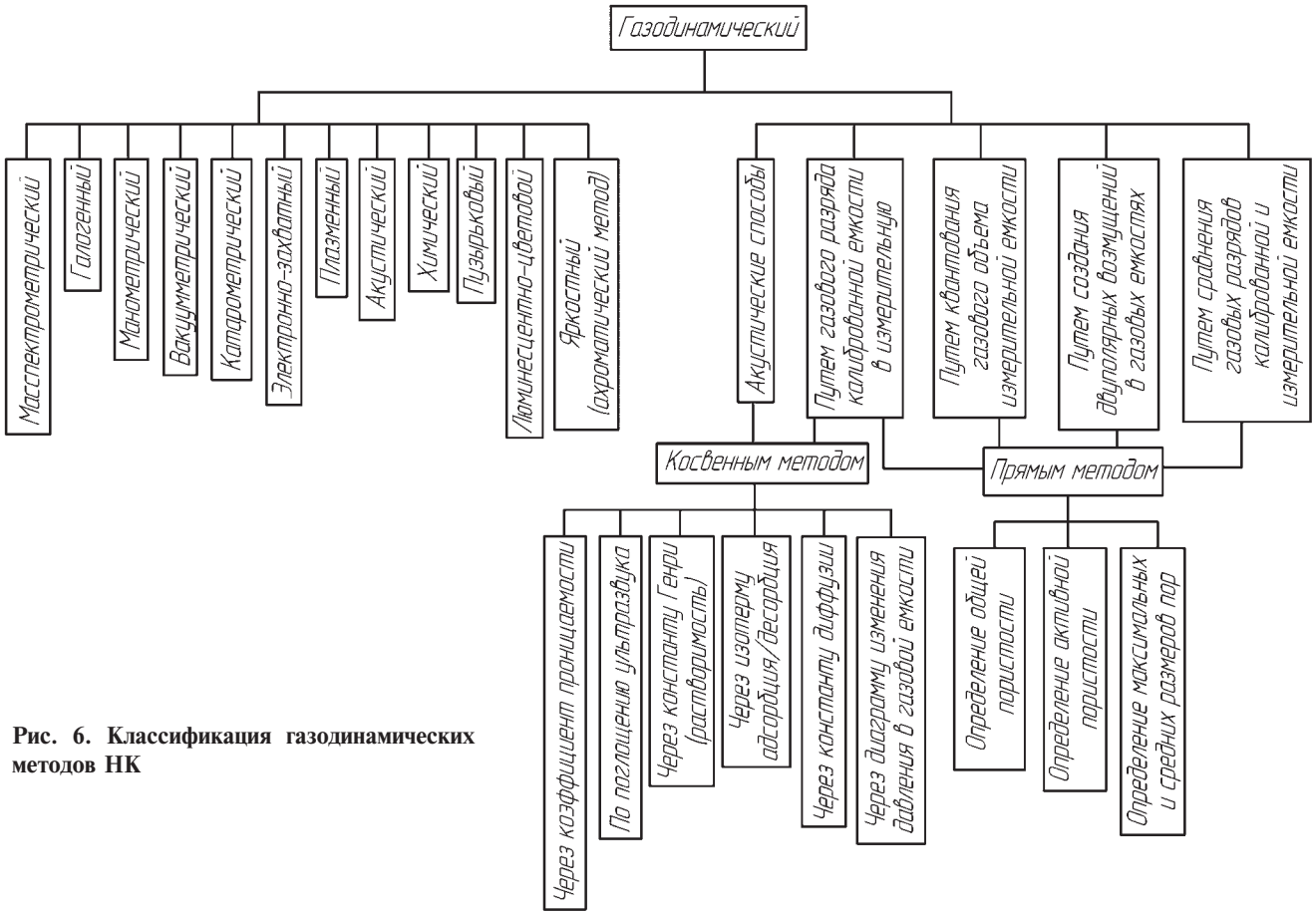


Рис. 6. Классификация газодинамических методов НК

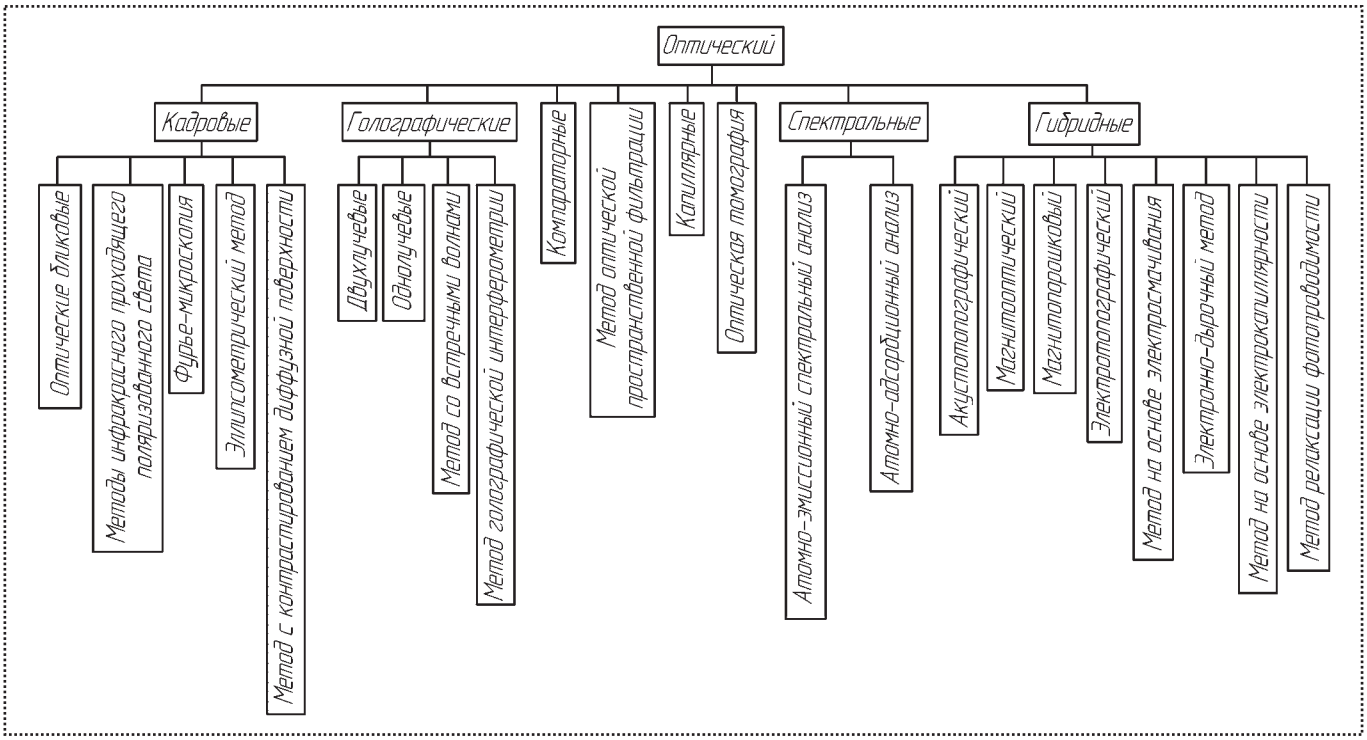


Рис. 7. Классификация оптических методов НК

ский снимок или запись этого изображения на запоминающем устройстве с последующим преобразованием в световое изображение. На практике этот метод наиболее широко распространен в связи с его простотой и документальным подтверждением получаемых результатов.

В зависимости от используемых детекторов различают *пленочную радиографию* и *ксерорадиографию (электрорадиографию)* (рис. 8). В первом случае детектором скрытого изображения и регистратором статического видимого изображения служит фото-

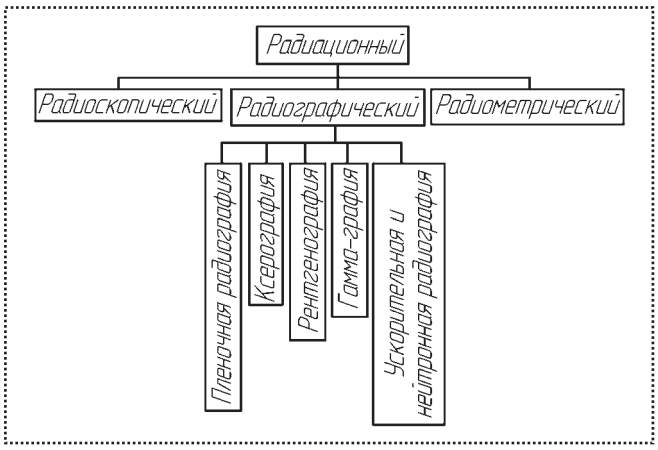


Рис. 8. Классификация радиационных методов НК

чувствительная пленка, во втором – полупроводниковая пластина, а в качестве регистратора используют обычную бумагу.

Данные методы позволяют контролировать изделия из пористых материалов различной толщины, позволяя обнаружить дефекты крупнее 17 мкм.

К *недостаткам* данных методов следует отнести опасность для здоровья человека и высокую стоимость используемого оборудования.

Радиоволновой неразрушающий контроль основан на анализе взаимодействия электромагнитного излучения радиоволнового диапазона с объектами контроля. На рис. 9 представлена классификация радиоволновых методов контроля пористости. К достоинствам метода следует отнести возможность контроля материалов различной степени прозрачности, помехоустойчивость оборудования по отношению к близкорасположенным предметам, возможность наблюдения и анализа быстропротекающих процессов. Основными *недостатками* являются высокая стоимость оборудования и сложность обнаружения дефектов при неравномерной структуре контролируемого материала.

Под *тепловыми методами* визуализации изображения понимают совокупность методов, основан-

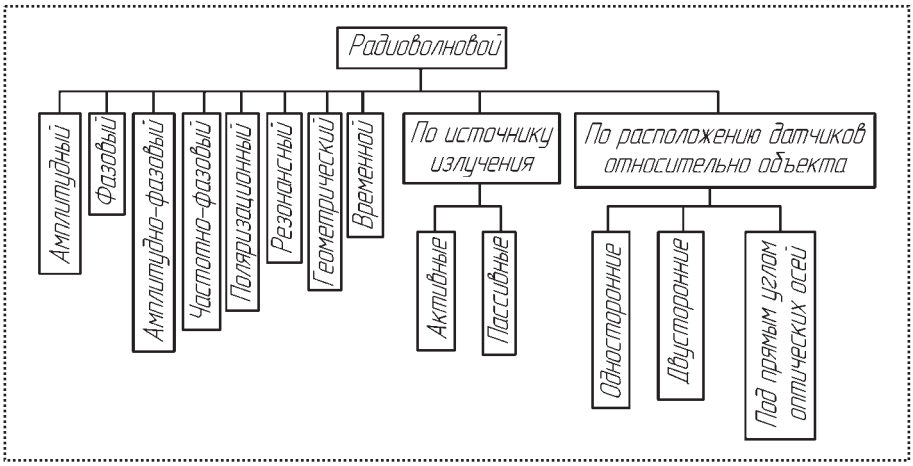


Рис. 9. Классификация радиоволновых методов НК

ных на свойстве объектов дефектоскопирования отражать тепловые поля.

Активные методы предполагают искусственный подогрев изделий, а *пассивные* – позволяют получать изображения тепловых полей поверхности функционируемых изделий без использования специального источника тепловой энергии (рис. 10).

Основными *недостатками* методов являются сложность обнаружения дефектов при неоднородной структуре материала контролируемого изделия и необходимость теплового воздействия на материал контролируемого изделия.

Электрические методы основаны на создании в контролируемом объекте электрического поля либо непосредственным воздействием на него электрическим возмущением, либо косвенно с помощью воздействия возмущениями неэлектрической природы.

Существуют *электропараметрические* методы (рис. 11), основанные на регистрации электрических характеристик объекта контроля (их еще называют методами, использующими внешние источники электрического сигнала), и *генераторные методы*, основанные на регистрации электрических сигналов, формируемых самим объектом контроля (их еще называют методами, использующими собственные источники электрических сигналов). Основными *недостатками* данных методов являются возможность использования только для электропроводящих материалов и чувствительность к неоднородности материала контролируемого изделия.

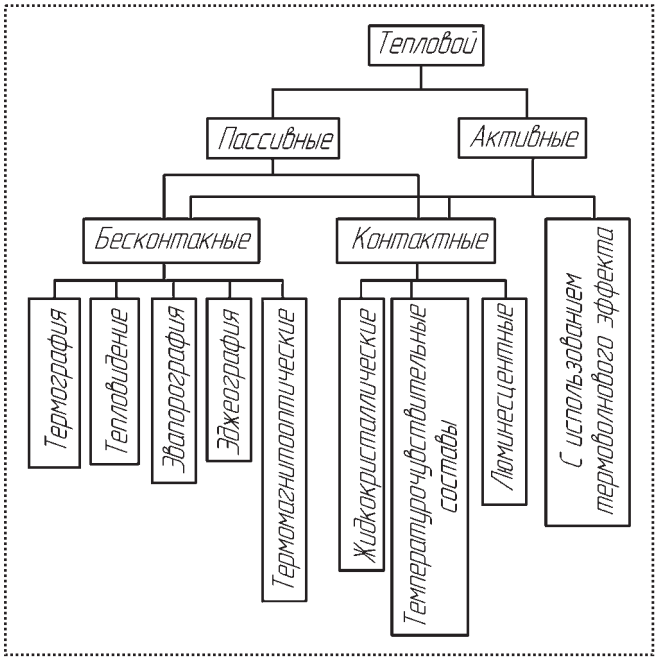


Рис. 10. Классификация тепловых методов НК

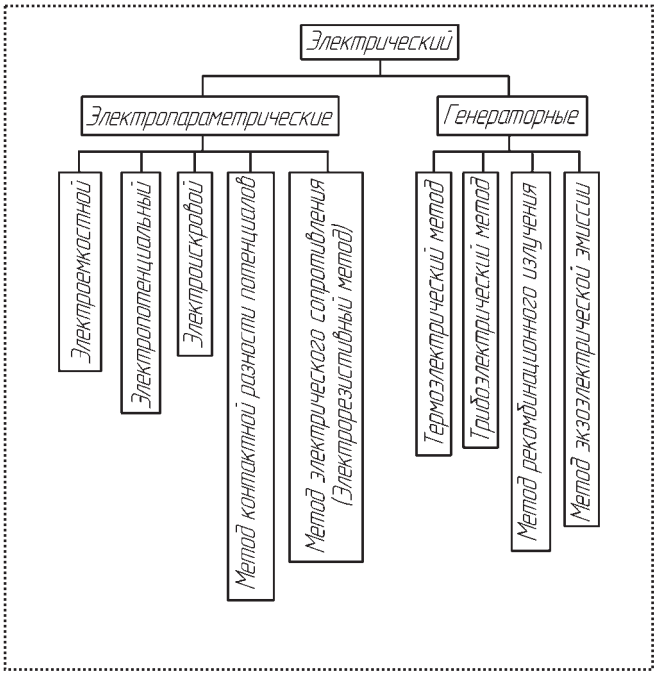


Рис. 11. Классификация электрических методов НК

Наиболее эффективными являются газодинамические средства измерения пористости материалов, в которых в качестве рабочего агента используют воздух или другой газ, например азот.

Как видно из классификации, газодинамический метод может быть реализован пятью способами:

♦ способ, основанный на газовом разряде калиброванной емкости в измерительную;

♦ сравнение газовых разрядов в измерительной и калиброванной емкостях;

♦ квантование газового объема измерительной емкости;

♦ формирование двуполярных возмущений в измерительной и калиброванной емкостях;

♦ применение акустических средств измерения в диапазоне звуковых и ультразвуковых возмущений.

В КГТА им. В.А. Дегтярева наиболее полно разработан первый способ, основанный на газовом разряде калиброванной емкости в измерительную, при этом *основными уравнениями, характеризующими процесс проникновения воздуха через материал, являются:*

• уравнение Дарси

$$q = K_{ф}\frac{\Delta p}{l}; \qquad (1)$$

• уравнение Фика для стационарного потока

$$q = -D\nabla\rho; \qquad (2)$$

• уравнение Фика для нестационарного потока

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = D\nabla^2\rho; \qquad (3)$$

• уравнение Лейбензона для изотермической фильтрации

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \frac{K_0 p_а}{П\mu}\nabla^2 p^2; \qquad (4)$$

• добавочное уравнение

$$q = \frac{V_и}{R_0 TF}\frac{dp_и}{dt}, \qquad (5)$$

где ρ – плотность газа, кг/м^3;

q – поток газа в единицу времени, кг/(с·м^2);

$K_ф$ – коэффициент фильтрации, с;

l – толщина контролируемого материала в направлении фильтрации, м;

Δp – перепад давления в материале (потери напора), Па;

D – коэффициент диффузии, м^2/с;

∇p – модуль градиента давления в исследуемом материале, Па/м;

$\nabla\rho$ – модуль градиента концентрации в исследуемом материале, кг/м^4;

K_0 – коэффициент проницаемости, м^2;

П – коэффициент пористости, %;

μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с;

$p_а$ – атмосферное давление, Па;

F – площадь материала, м^2;

R_0 – газовая постоянная, Дж/(кг·К);

$V_и$ – объем газа в измерительной емкости, м^3;

$p_и$ – давление газа в измерительной емкости в текущий момент времени, Па;

T – температура, К;

t – время, с.

Для двухмерного случая (движение газа через пористый материал толщиной l и диаметром d) уравнения (2)–(4) примут вид:

♦ уравнение Фика для стационарного потока

$$q = -D\sqrt{\left(\frac{\partial\rho}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial\rho}{\partial y}\right)^2}\Bigg|_{\substack{x=l\\ y=d}}; \qquad (6)$$

♦ уравнение Фика для нестационарного потока

$$\frac{\partial\rho}{\partial t} = D\left(\frac{\partial^2\rho}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\rho}{\partial y^2}\right); \qquad (7)$$

♦ уравнение Лейбензона

$$\frac{\partial p^2}{\partial t} = \frac{K_0 p_а}{П\mu}\left(\frac{\partial^2 p^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p^2}{\partial y^2}\right). \qquad (8)$$

Решение уравнения (7) $\rho(x, y, t)$ должно удовлетворять следующим граничным и начальным условиям:

$$0 < x < l;\ 0 < y < d;\ t > 0;$$

$$\rho_y(x, 0, t) = \rho(x, d, t) = 0,\ 0 < x < l;\ t > 0;$$

$$\rho(0, y, t) = \rho_а,\ \rho(l, y, t) = 0,\ 0 < y < d,\ t > 0; \qquad (9)$$

$$\rho(x, y, 0) = f(x, y),\ 0 < x < l,\ 0 < y < d.$$

Для решения системы уравнений (6)–(8) рассмотрим уравнение (7) в следующем виде:

$$\frac{\partial\overline{\rho}}{\partial t}=D\left(\frac{\partial^2\overline{\rho}}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\overline{\rho}}{\partial y^2}\right),\ 0<x<l,\ 0<y<d,\ t>0, \quad (10)$$

где материал начинаем рассматривать с противоположного торца:

$$\overline{\rho}(x,\ y,\ t)=\rho(x,\ y,\ t)-\frac{\rho_а x}{l};$$

$$\overline{\rho_y}(x,\ 0,\ t)=\overline{\rho}(x,\ d,\ t)=0,\ 0<x<l; \quad (11)$$

$$\overline{\rho}(0,\ y,\ t)=\overline{\rho}(l,\ y,\ t)=0,\ 0<y<d;$$

$$\overline{\rho}(x,\ y,\ 0)=f(x,\ y),\ 0<x<l,\ 0<y<d.$$

В результате проведения ряда преобразований получаем следующие зависимости [3]:

■ коэффициент растворимости (константа Генри)

$$K_г=\frac{2\mu V_и l t_с}{F^2\nu p_а^2}\frac{(p_и-p_с)}{(t_и-t_с)}, \quad (12)$$

где $t_с$, $p_с$ – соответственно время и давление газа в момент перехода от кнудсеновского режима течения газа к ламинарному;

ν– коэффициент кинематической вязкости;

$t_и$ – текущий момент времени, в который измеряют давление $p_и$ в измерительной емкости;

■ коэффициент фильтрации

$$K_ф=\frac{2\mu V_и l}{F\nu p_а^2}\frac{(p_и-p_с)}{(t_и-t_с)}; \quad (13)$$

■ коэффициент пористости

$$\Pi=\frac{2V_и l t_с}{F^2 p_а}\frac{(p_и-p_с)}{(t_и-t_с)}; \quad (14)$$

■ коэффициент газопроницаемости

$$K_0=\frac{2\mu V_и l}{F p_а^2}\frac{(p_и-p_с)}{(t_и-t_с)}; \quad (15)$$

■ коэффициент диффузии

$$D=\frac{(p_и-p_с)V_и l}{F p_а(t_и-t_с)}. \quad (16)$$

Здесь $t_с=\frac{8d^2}{11D}$ или $t_c=\frac{8d^2\Pi\mu}{11K_0 p_а}$.

На рис. 12 представлена схема устройства для реализации данного способа.

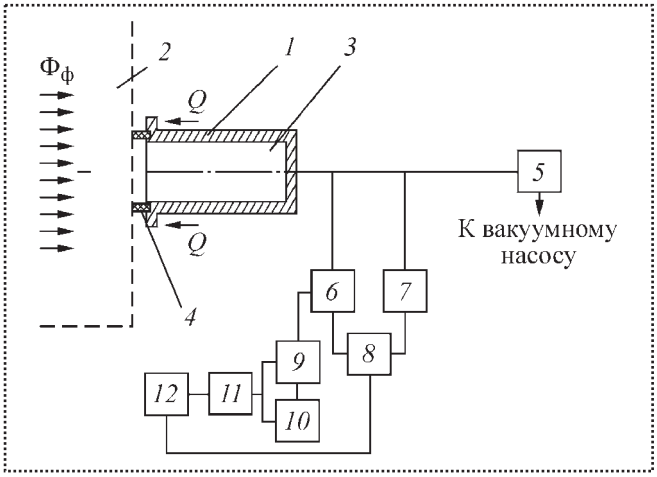


Рис. 12. Схема измерительного устройства

Устройство содержит измерительный стакан *1*, соединенный с контролируемым материалом *2*, который при помощи скобы (условно не показано) прижимают к материалу *2* силой *Q*, образуя измерительную камеру *3* устройства. Кольцо *4* из вакуумной резины служит для герметизации системы.

Измерительная камера *3* посредством клапана *5* соединена с вакуумным насосом (условно не показан), который позволяет создавать разряжение в измерительной камере *3*.

Для измерения давления в камере *3* перед клапаном *5* установлены датчик давления *6* и датчик времени *7*, выходы которых подсоединены к ЭВМ *8*. Датчик давления *6* соединен с усилителем сигнала *9*, выход которого подключен к запоминающему устройству *10*. Усилитель сигнала *9* и запоминающее устройство *10* соединены со сравнивающим устройством *11*, выход которого соединен с преобразователем сигнала *12*, второй выход которого подключен к ЭВМ *8*.

Работа устройства осуществляется следующим образом.

После открытия клапана *5* и создания вакуума при помощи вакуумного насоса в измерительной камере *3*, клапан *5* закрывается. Так как с внешней плоскости материала – атмосферное давление, а в измерительной камере *3* – вакуум, будет наблюдаться фильтрационный поток газа ($Ф_ф$) через материал. Давление в камере *3* будет повышаться. Изменение давления с течением времени будет отслеживаться датчиком давления *6* и датчиком времени *7*, данные с которых передаются на вход ЭВМ *8*.

Концентрация газа в камере *3* при повышении давления будет изменяться. Усилитель сигнала *9* при изменении давления газа будет усиливать сиг-

нал об изменении приращения давления в камере *3*, а запоминающее устройство *10* – фиксировать каждое последующее приращение давления, соответствующее определенному промежутку времени.

Сравнивающее устройство *11* осуществляет сравнение последующего приращения давления с предыдущим и подает информацию о новом значении давления в измерительной камере *3* на преобразователь сигнала *12*. Преобразователь сигнала преобразовывает приращение давления газа в камере *3* в приращение объема газа и подает данные на ЭВМ *8*, которая строит графическую зависимость изменения давления в измерительной камере *3* с течением времени, определяет численные значения давлений $p_с$, $p_и$, времени $t_с$ и $t_и$ (фиксированные промежутки времени), где $t_и > t_с$, $p_и > p_с$ и объема газа $V_и$.

Данные о площади F материала, ограниченной измерительной камерой, атмосферном давлении $p_а$, газовой постоянной R_0, коэффициенте кинематической вязкости ν, коэффициенте динамической вязкости μ, толщине l и диаметре d материала введены в ЭВМ *8* заранее. Поэтому ЭВМ осуществляет определение коэффициента фильтрации по формулам (12)–(16).

Вывод

Из анализа методов автоматизированного неразрушающего контроля параметров пористости для определения физико-механических свойств материалов наиболее простым, безопасным и экономически выгодным является газодинамический метод контроля.

Библиографический список

1. **Лопухин В.А., Гурылёв А.С.** Автоматизация визуального технологического контроля в электронном приборостроении. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1987. 287 с.

2. **Неразрушающий** контроль и диагностика: Справочник / В.В. Клюев, Ф.Р. Соснин, А.В. Ковалёв и др.; под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 656 с.

3. **Способ** определения параметров пористости: Патент РФ № 2235308, МКИ[3] G01N15/08 // Ю.З. Житников, А.Н. Иванов, Ю.Н. Матросова, А.Е. Матросов. Б. И. № 24, 2004.

УДК 621.83:621.9.048

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

Сопоставление качества поверхностного слоя зубьев зубчатых колес после электроэрозионной обработки и обработки резанием*

Проведен анализ качества поверхностного слоя зубьев зубчатых колес газотурбинных двигателей после электроэрозионной обработки и обработки резанием. Приведены характеристики эксплуатационных свойств деталей, изготовленных электроэрозионной обработкой.

Article provides quality analysis of gearwheels tooth's surface layers made by cutting and electroerosion machine. Exploitation parameters of gearwheels tooth's made by electroerosion machine are also provided.

Ключевые слова: качество, поверхностный слой, зубчатое колесо, резание.

Key words: quality, surface, cogwheel, cut.

Поверхности, полученные при электроэрозионной обработке, по характеру шероховатости значительно отличаются от поверхностей, обработанных резанием. Микронеровности имеют вид лунок, нерегулярно расположенных на обработанной поверхности. Границы между отдельными микронеровностями обозначены нечетко. Качество рабочей поверхности детали, обработанной электроэрозией, характеризуют *степенью шероховатости, глубиной дефектного слоя* и *термическими изменениями* в поверхностных слоях металла.

На рис. 1 приведены кривые распределения высоты микронеровностей на обработанной поверхности, из которой видно, что высота последовательно измеренных микронеровностей для одного режима изменяется значительно.

Микрорельеф поверхности после электроэрозионной обработки в отличие от микрорельефа, получаемого резанием, более неоднороден. Коэффициент неоднородности микрорельефа (отношение высот микронеровностей к их среднему значению) составляет 1,5 и даже более. Коэффициент запол-

*Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2007. № 1 (11).

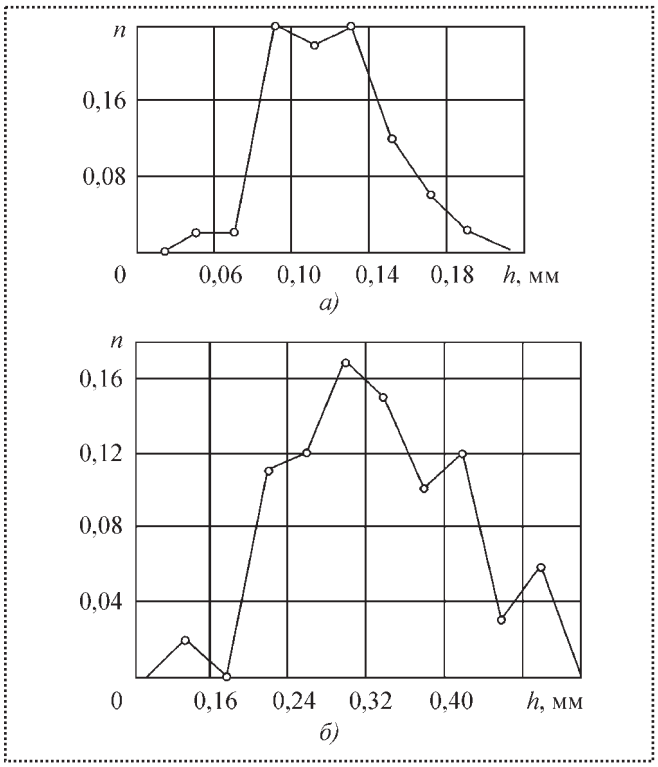


Рис. 1. Распределение высот неровностей *h* поверхности при токе:
а – $I_{ср}$ = 10 А; *б* – $I_{ср}$ = 300 А; материал образца – сталь; материал электрода – медь; *n* – относительная частота случаев

нения профиля находится примерно в тех же пределах, что и при обработке резанием. Из-за значительной неоднородности микрорельефа и нерегулярного распределения микронеровностей оценка шероховатости поверхности после электроэрозионной обработки затруднена. Для некоторых режимов обработки установлено, что *Rz* примерно в 2 раза выше среднеарифметического значения высот микронеровностей, а на чистовых режимах *Rz* в 4–5 раз превышает среднеарифметическое отклонение от средней линии.

При сравнении поверхностей, обработанных одним методом, более износостойкой будет поверхность, у которой больше опорная длина профиля. При сравнении поверхностей, обработанных различными способами, но с одинаковыми параметрами шероховатости, более износостойкой будет поверхность, у которой отсутствует направленная шероховатость. При наличии направленной шероховатости после обработки резанием основной объем смазки может быть выдавлен из зоны бóльших в зону меньших давлений, что предопределяет возможность схватывания контактируемых поверхностей. У поверхностей, обработанных электроэрозионным способом, такого явления нет ввиду отсутствия направленной шероховатости, взаимной изоляции отдельных углублений, в которых сосредотачивается смазка.

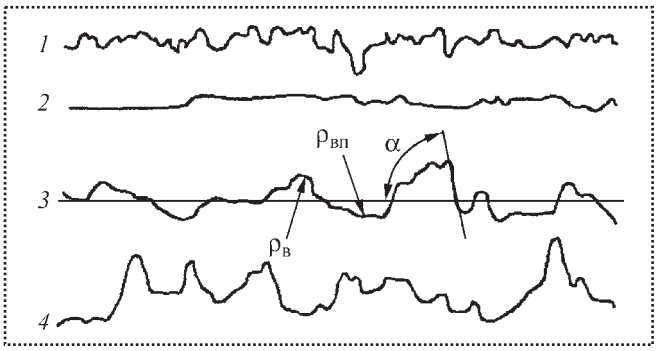


Рис. 2. Профилограммы шлифованной поверхности (*1*, *2*) и поверхности после электроэрозионной обработки (*3*, *4*)

На рис. 2 приведены профилограммы шероховатости, записанные в двух взаимно-перпендикулярных направлениях с поверхностей, обработанных механическим и электроэрозионным способами. Профилограммы иллюстрируют принципиальное различие шероховатости в направлении перемещения металлорежущего инструмента и в перпендикулярном направлении и близость показателей ($\rho_в$ – радиус вершин, $\rho_{вп}$ – радиус впадин и α – угол микронеровностей) у поверхности после электроэрозионной обработки.

Среднее значение шероховатости *R* поверхности, обработанной электроэрозионным способом, смещено на величину ΔR в сторону меньших значений высот неровностей в сравнении с нормальным законом распределения высот в результате механической обработки (рис. 3). Это приводит к существенно неравномерному распределению металла по высоте шероховатости и значительному уменьшению относительной опорной длины профиля $t_р$ при контактировании сопрягаемых поверхностей.

Сопоставление $\rho_в$ и α шероховатых поверхностей стальных деталей, обработанных электроэрозионным и другими способами, показывает, что $\rho_в$ возрастает существенно, а α – незначительно с переходом к грубым режимам электроэрозионной обработки, в то время как при точении, внутреннем шлифовании, строгании и виброобкатывании, наоборот, при грубой обработке $\rho_в$ и α уменьшаются [1]. При *Rz* 10...40 $\rho_в$ шероховатости поверхности, обработанной электроэрозионным способом, зна-

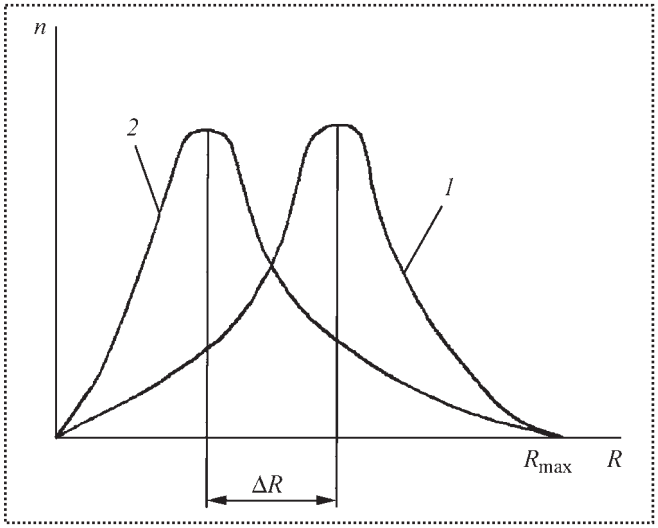


Рис. 3. Сопоставление распределений неровностей *R* профиля поверхностей после механической обработки (*1*) и электроэрозионной обработки (*2*)

чительно выше, чем поверхностей, обработанных шлифованием, точением и строганием, и только такие методы обработки, как виброобкатывание и выглаживание, обеспечивают большее значение $\rho_в$, чем после электроэрозионной обработки.

Параметры шероховатости поверхности после электроэрозионной обработки существенно отличаются от соответствующих параметров поверхностей, обработанных методами резания и виброобкатыванием. Для каждого материала они не являются постоянными и изменяются в пределах режимов обработки в большей (Rz, $\rho_в$, $\rho_{вп}$) или меньшей (α) степени. В результате при эксплуатации деталей машин, обработанных электроэрозионным способом, происходит интенсивное смятие неровностей, постоянное разделение контактирующих поверхностей слоем смазки, отсутствует их схватывание, обусловливая иной характер износа в сравнении с износом поверхностей, обработанных слесарно-механическим способом.

Поверхностный слой после электроэрозионной обработки характеризуется специфическим микрорельефом, в нем образуются остаточные напряжения, распределенные по глубине, изменяются микротвердость и структурно-фазовый состав материала. Свойства этого слоя сильно зависят от режима обработки (табл. 1).

В результате термического воздействия поверхностные слои металла претерпевают структурные изменения, причем зона термического влияния располагается по обрабатываемой поверхности неравномерно. Распространение термического эф-

1. Влияние режима электроэрозионной обработки на показатели качества поверхностного слоя стали

Переход	Производительность, мм^3/мин	Rz, мкм	Глубина измененного слоя, мм	Уровень остаточных напряжений
Черновой	$2\cdot10^2...3\cdot10^4$	40...320	0,2...0,3	Высокий
Получистовой	30...200	10...40	0,1...0,2	Средний
Чистовой	Менее 30	1,25...10	0,05...0,1	Низкий

фекта зависит от энергии импульсов. Это можно видеть из табл. 2. Зависимость наибольшей глубины термически измененного слоя от энергии импульсов при постоянной скважности [2] может быть записана в виде формулы

$$h_t \approx C_t W_S^m,$$

где C_t – коэффициент, зависящий от материала, мкм/Дж;

W_S – энергия импульсов, Дж;

m – показатель степени (для сталей m = = 0,4...0,42).

Поверхностный слой материала обрабатываемой детали подвергают локализованному и кратковременному, но весьма интенсивному термическому воздействию. Большая часть расплавленного материала и его паров удаляется из зоны разряда, но некоторая часть остается в лунке.

При охлаждении на поверхности лунки образуется слой, по свойствам иногда сильно отличающийся от основного материала – модифицированный слой высокой твердости (около 1000 HV), за-

2. Наибольшая глубина зоны термического влияния

Энергия импульсов, Дж	Глубина зоны термического влияния, мм
0,0027	0,01 (слой прерывистый)
0,020	0,02 (слой прерывистый)
0,1	0,04...0,05 (слой прерывистый)
0,6	0,1...0,12
7	0,18...0,2
20	0,25...0,26
200	0,9...1

Примечания: 1. Обрабатываемый материал – сталь, твердость 48 HRC.

2. Данные получены при постоянной скважности.

щищающий деталь от износа. Толщина модифицированного слоя – в пределах 1...2 мкм. Может быть получен значительно меньший по толщине слой, но при этом возрастет время обработки. В результате ресурс зубчатого венца увеличивается в 2–3 раза. Поверхность полностью защищена от коррозии.

Глубина измененного слоя зависит от энергии импульсов, их длительности и теплофизических свойств обрабатываемого металла. При длительных импульсах тока большой энергии глубину измененного слоя измеряют десятыми долями миллиметра, а при весьма коротких импульсах малой энергии – сотыми долями миллиметра и микрометрами.

Вследствие хрупкости и неравномерной плотности поверхностный слой в большинстве случаев является дефектным. Он снижает прочностные свойства металла, так как при механических нагрузках, особенно знакопеременных, в нем легко возникают трещины, которые могут распространяться в тело детали. Глубина измененного слоя практически не зависит от длительности обработки.

После термообработки деталей из углеродистой стали, обработанной электроэрозионным способом, белый слой существенно изменяется. Так, при отпуске резкая граница между ним и остальной частью поверхностного слоя исчезает, начинает образовываться переходная зона. В результате отжига часть углерода диффундирует из белого слоя внутрь поверхностного слоя, что сопровождается снижением микротвердости.

Зона термического влияния значительно превышает по размерам белый слой. Ее глубина зависит от материала и исходного состояния заготовки, свойств рабочей среды, режимов обработки.

Верхние слои металла имеют повышенную твердость. С повышением частоты импульсов глубина термически измененного слоя уменьшается. При высокочастотной электроэрозионной обработке на финишных режимах глубина измененного слоя для сталей составляет 0,01...0,03 мм, причем термически измененный слой залегает в виде отдельных зон.

Изменение микротвердости оплавленного поверхностного слоя показывает, что твердость его выше твердости основного металла. Увеличение твердости оплавленного слоя можно объяснить образованием в нем карбидов хрома за счет насыщения слоя углеродом из рабочей жидкости.

При электроэрозионной обработке с высокой плотностью тока электрод-инструмент расплавляется, а пары и капли его материала переносятся на обрабатываемую поверхность и, перемешиваясь с расплавленным металлом заготовки, образуют оксиды. После охлаждения расплава на обрабатываемой поверхности формируется белый слой, в состав которого входят медь, алюминий, вольфрам и другие элементы материала электрод-инструмента [3]. В зависимости от режима обработки и материала электрода-инструмента толщина белого слоя составляет 0,15...0,4 мм при глубине слоя, подвергнутого тепловому влиянию 0,5...0,8 мм.

Специфический характер поверхностного слоя после электроэрозионной обработки существенно влияет на эксплуатационные свойства обработанных деталей: износостойкость, контактную прочность, коррозионную стойкость и др.

Износостойкость поверхностей после электроэрозионной обработки, по сравнению с поверхностями после механической обработки, значительно возрастает. Для трущихся во время эксплуатации деталей машин это объясняется, *во-первых,* микрогеометрией обработанной поверхности, способствующей лучшему удержанию тонкого слоя масла благодаря лункам. *Во-вторых,* наличием "белого слоя", отличающегося повышенной твердостью.

Вывод

Механическая прочность при нагружении деталей, изготовленных электроэрозионной обработкой, практически равноценна прочности деталей после обработки их резанием. Контактная прочность обработанных деталей в связи с наличием оплавленного слоя и остаточных напряжений снижается на 5...10 %. Появление в поверхностном слое сетки микротрещин вызывает еще более резкое снижение контактной прочности. Для восстановления длительной прочности и выносливости деталей необходимо удалять припуск, равный, по меньшей мере, удвоенной глубине оплавленного слоя.

Использование технологических процессов изготовления зубчатых колес с применением электроэрозионной обработки позволяет повысить срок службы их деталей в 2–8 раз.

Библиографический список

1. **Шнейдер Ю.Г.** Образование регулярных микрорельефов на деталях и их эксплуатационные свойства. Л.: Машиностроение, 1972. 184 с.

2. **Елисеев Ю.С., Крымов В.В., Митрофанов А.А. и др.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей: Под ред. Б.П. Саушкина. М.: Дрофа, 2002. 656 с.

3. **Фотеев Н.К., Капырин А.А.** Перенос материала электрода-инструмента на поверхность детали в процессе размерной электроэрозионной обработки // Электронная обработка материалов. 1986. № 2. С. 23–25.

УДК 621.89

А.Н. Сутягин *(Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева)*

Проблема обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей узлов трения*

Рассмотрены вопросы обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей узлов трения на основе управления геометрическими и физико-механическими параметрами качества поверхностного слоя, формирующимися в результате механической обработки.

Article discusses guaranteeing wear resistance of surface layers of friction assemblies details based on managing geometrical, physics and mechanical quality parameters of surface layers, which made by machining.

Ключевые слова: трение, износ, пластическая деформация, механическая обработка, термоЭДС.

Key words: friction, wear, plastic deformation, machining operation, thermoelectromotive force.

Одной из важнейших задач машиностроительного производства является задача повышения качества машиностроительной продукции. Известно, что до 80 % случаев выхода из строя машин при эксплуатации происходит из-за износа в сопряжениях узлов трения, поэтому, безусловно, актуальными являются исследования, направленные на решение задач по технологическому обеспечению эксплуатационных показателей деталей машин на основе выбора рациональных технологических условий механической обработки по критерию износостойкости.

Износ деталей машин характеризуется разрушением контактного поверхностного слоя, в котором в результате взаимодействия сопрягающихся поверхностей происходят физико-химические, усталостные изменения. Разрушение при износе имеет кумулятивный характер и является результатом последовательного многократного накопления повреждений, поэтому износостойкость весьма чувствительна к незначительному изменению свойств материалов.

Проблема разрешения охватывает сложный комплекс физических явлений, определяющих прочность изучаемого объекта. Основным явлением, характеризующим природу разрушения, является образование и развитие трещин, имеющих большое значение в металлообработке в отношении производительности и качества процесса резания. Появление микротрещин связано с механизмами развития дислокаций, заторможенного сдвига, вскрытия или пересечения полос скольжения, структурными изменениями под влиянием силового и температурного полей в процессе пластической деформации. В процессе трещинообразования основным является механизм образования микротрещин в карбидных частицах, действующих в ферритной матрице как мощный концентратор напряжений, что приводит к зарождению разрушения уже при 1 % деформации. А.М. Вульф [1] отмечает, что более 90 % общего числа микротрещин связано с этим явлением.

А.Ю. Ишлинским [2] выдвинута модель трения и изнашивания поверхностей металлических материалов, согласно которой при фрикционном силовом взаимодействии в тонких поверхностных слоях происходит пластическая деформация, неизбежно сопровождающаяся увеличением плотности дефектов кристаллического строения, главным образом дислокаций. Это, в свою очередь, приводит к уменьшению подвижности последних, что и проявляется как упрочнение. При достижении предельной плотности дислокаций слой охрупчивается и разрушается. Затем все стадии повторяются в слое, вышедшем на поверхность, что в динамике придает процессу периодический характер.

Анализ отказов и снижения ресурсов ответственных сопрягаемых деталей машин, подверженных процессам усталостного разрушения и износа поверхностей, свидетельствует о необходимости выделения одного или группы триботехнических

*Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева. 2007. № 1 (11).

показателей, которые в наибольшей степени характеризуют нарушение работоспособности соединений. Наибольший практический интерес представляют те из них, которые непосредственно связаны с параметрами состояния поверхностного слоя деталей и их эксплуатационными свойствами, в частности с износостойкостью.

В совокупности с геометрическими параметрами поверхности (макроотклонением, волнистостью, шероховатостью и др.) таким показателем может стать модуль упругости E поверхностных слоев (модуль Юнга). При всем разнообразии процессов поверхностного разрушения (усталостные процессы при трении, абразивное изнашивание, резание металлов и др.) их объединяет протекание пластической деформации в поверхностных микрообъемах, сопровождающееся накоплением дефектов кристаллического строения в тонком поверхностном слое материала детали (прежде всего дислокаций).

В то же время установлено, что повышение плотности дислокаций в результате микропластической деформации поверхностных слоев приводит к изменению модуля Юнга поверхностных микрообъемов. Так, при

$$E_{\text{пов}} \approx 0{,}7E_0 \text{ [3]},$$

где $E_{\text{пов}}$ – модуль упругости поверхностного слоя материала;

E_0 – исходный модуль упругости материала, поверхностные слои металлических материалов находятся в предельно деформированном состоянии, предшествующем хрупкому разрушению поверхностных микрообъемов.

Кроме того, существуют корреляционные зависимости модуля упругости с коэффициентом износостойкости, пределом выносливости и пределом прочности металлов. Так, А.М. Хрущевым была определена взаимосвязь между стойкостью на истирание и модулем упругости для 20 чистых металлов, сплавов Cu–Ni и др. в виде [3]

$$e = 0{,}49 \cdot 10^{-4} E^{1,3}, \qquad (1)$$

где e – относительная стойкость, т.е. отнесенная к износостойкости эталонного материала.

Позднее было выявлено, что факторы, увеличивающие значение модуля, повышают износостойкость, и наоборот. Таким образом, представляется возможным по величине относительной износостойкости оценивать ресурс сопрягаемых деталей машин.

Анализ литературных данных показывает, что износостойкость зависит от геометрических и физико-механических (глубина и степень наклепа, величина и знак остаточных напряжений и др.) параметров поверхностного слоя деталей, которые, в свою очередь, формируются в процессе механической обработки.

Износ протекает постоянно, начиная с момента работы соединения, но происходит неравномерно. После приработки создается оптимальная шероховатость [4], не зависящая от первоначальной, полученной в результате механической обработки.

При механической обработке в зоне резания одновременно действуют значительные силы резания, создающие наклеп, и температура, вызывающая разупрочнение металла. Конечное состояние поверхностного слоя металла определяется соотношением процессов упрочнения и разупрочнения, зависящим от преобладания действий в зоне резания силового или теплового факторов. В связи с этим при различных методах и режимах механической обработки, разных режимах и различных геометрических параметрах режущего инструмента степень и глубина распространения наклепа оказываются различными. При этом всякое изменение режима резания, связанное с увеличением сил резания и степени пластической деформации, ведет к повышению степени наклепа [5]. Наличие наклепа повышает износостойкость деталей узлов трения до наступления момента перенаклепа (рис. 1) [6].

Если степень пластической деформации поверхностного слоя превосходит определенное для

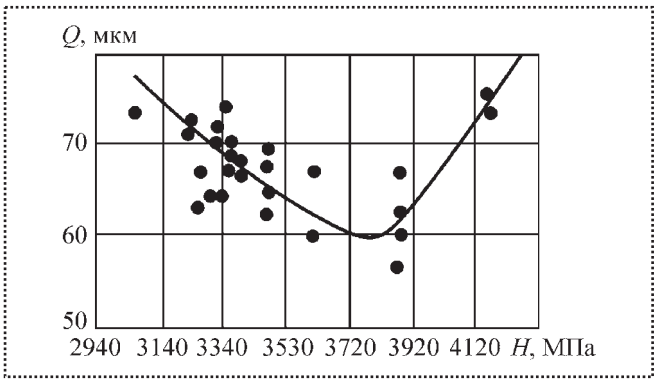


Рис. 1. Зависимость износа *Q* стали У7 от степени предварительного наклепа *H*

данного металла значение, то в металле начинается процесс его разрыхления (разрывы межатомных связей по плоскостям скольжения и субмикроскопические нарушения сплошности металла), происходящий одновременно с продолжающимся процессом упрочнения [6].

Образование остаточных напряжений при различных технологических процессах происходит различным образом. В основе их возникновения обычно лежат необратимые объемные изменения в материале [7]. В процессе трения в поверхностном слое детали возникают остаточные напряжения сжатия, величина которых не связана с величиной и знаком напряжений, имевшихся в поверхностном слое детали до износа [6].

Из вышесказанного следует, что в процессе механической обработки необходимо назначать такие режимы, которые будут способствовать формированию шероховатости поверхности и физико-механических характеристик поверхностного слоя, максимально приближенных к тем, которые возникают в процессе приработки, что снизит время приработки подвижного соединения и повысит износостойкость, а следовательно, и ресурс деталей узла трения.

При прогнозировании износостойкости поверхностных слоев деталей подвижных соединений за счет назначения режимов механической обработки возникает проблема контроля полученных эксплуатационных свойств по критерию износостойкости.

А.Г. Сусловым [8] было отмечено, что износостойкость поверхностного слоя деталей в большей мере зависит от степени упрочнения поверхностного слоя деталей. Поэтому в первом приближении износостойкость поверхностного слоя деталей может быть оценена по его твердости.

Испытание на твердость – наиболее массовое высокопроизводительное испытание материалов – занимает особо важное место среди средств контроля качества материалов и их обработки. Вместе с тем такое испытание является тонким и надежным методом физико-химического анализа. Поэтому развитие научных основ этого испытания, его унификация и всемерное расширение областей применения представляют весьма актуальную задачу.

В настоящее время в машиностроении широкое распространение получили методы неразрушающего контроля, основанные на электромагнитных, термоэлектрических, тепловых и др. видах физических явлений, обладающих своими преимуществами и недостатками. Интересно в этом плане явление изменения термоэлектродвижущей силы металлов при пластической деформации. Это одно из термоэлектрических явлений, обусловленное связью между тепловыми и электрическими токами. Анализируя данное явление, можно заметить его взаимосвязь с твердостью и микротвердостью металлов и сплавов. Поэтому термоЭДС, как и твердость, может служить комплексным параметром, с помощью которого может быть произведена оценка характеристики эксплуатационных свойств деталей [9], в частности по критерию износостойкости.

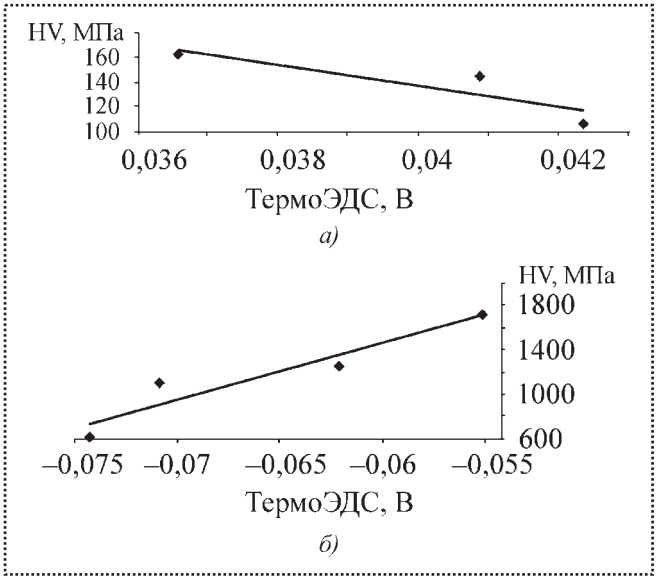


Рис. 2. Зависимость термоЭДС от твердости по Виккерсу, материал Ст3:
а – для Ст3: $y = -8572{,}1x + 480{,}21$, $R^2 = 0{,}7833$; *б* – для сплава ВТ-9: $y = 50783x + 4505{,}1$, $R^2 = 0{,}9037$; R^2 – величина достоверности аппроксимации

Анализ литературных источников подтвердил правомерность гипотезы о том, что зависимость между твердостью по Виккерсу и термоЭДС носит линейный характер. Для решения данной задачи была спроектирована экспериментальная установка для измерения термоЭДС поверхностного слоя деталей. Была разработана методика количественной оценки твердости на основе измерения термоЭДС. В результате проведенных исследований были получены зависимости термоЭДС от твердости по Виккерсу для Ст3, ВТ-9, ЭИ437БВД (на рис. 2 представлены зависимости термоЭДС от материалов Ст3 и ВТ-9). При проведении опытов для выбранных материалов было установлено, что

зависимость термоЭДС и твердости по Виккерсу действительно носит линейный характер.

Обеспечение износостойкости поверхностного слоя деталей узлов трения является одной из важнейших задач в современном авиастроении. Анализ влияния на интенсивность износа параметров шероховатости, степени наклепа и остаточных напряжений поверхностного слоя деталей узлов трения показывает, что совместное управление этими показателями позволит повысить их надежность. Поэтому очень важным аспектом решения такой задачи является разработка алгоритма расчетного определения технологических условий механической обработки в целях обеспечения износостойкости поверхностного слоя деталей узлов трения.

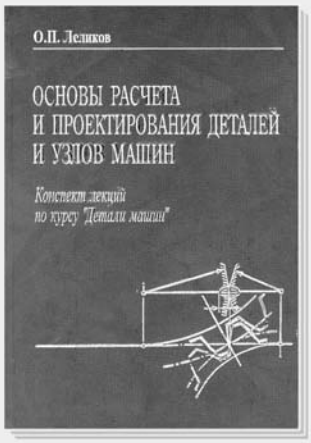
Вывод

Такой алгоритм позволит технологу на стадии проектирования технологического процесса определить режимы механической обработки, после которой на детали сформируется поверхностный слой с определенными геометрическими и физико-механическими свойствами, обеспечивающими минимальный износ в процессе приработки в узле трения.

Библиографический список

1. **Вульф А.М.** Резание металлов. Изд. 2-е. Л.: Машиностроение (Ленингр. отд-ние), 1973. 496 с.
2. **Ишлинский А.Ю.** Математическая теория пластичности / А.Ю. Ишлинский, Д.Д. Ивлев. М.: Наука, 2003. 704 с.
3. **Безъязычный В.Ф.** Проблемные вопросы упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов при пластической деформации и представление о наклепе / В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин, М.В. Тимофеев, М.А. Прокофьев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 3–6.
4. **Комбалов В.С.** Влияние шероховатости твердых тел на трение и износ. М.: Наука, 1974.
5. **Маталин А.А.** Точность механической обработки и проектирование технологических процессов. М.: Машиностроение, 1970. 320 с.
6. **Маталин А.А.** Технология механической обработки. М.: Машиностроение, 1977. 462 с.
7. **Лурье Г.Б.** Шлифование металлов. М.: Изд-во "Машиностроение", 1969. 172 с.
8. **Суслов А.Г.** Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств контактирующих деталей. Автореферат дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук. М., 1982.
9. **Сутягин А.Н.** ТермоЭДС как комплексный параметр оценки эксплуатационных свойств деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 2006. № 3. С. 59–61.

Книги издательства "Машиностроение"



Леликов О.П. **Основы расчета и проектирования деталей и узлов машин**. Конспект лекций по курсу "Детали машин". 3-е изд., 2007. – 464 с., тв. пер., 60×88 1/16

ISBN 978-5-217-03390-4

Цена с НДС 363 руб.

Изложены теоретические основы и инженерные методы расчета и проектирования деталей и узлов общемашиностроительного применения. Рассмотрены наиболее сложные темы по основным разделам курса "Детали машин": разъемные и неразъемные соединения, передачи трением и зацеплением; валы и оси; подшипники качения и скольжения; муфты приводов и др.

3-е издание (2-е изд. 2004 г.) исправлено и переработано в соответствии с современной научно-технической документацией, а также дополнено приложением по новой методике расчета ресурса подшипников качения.

Для студентов технических специальностей вузов; может быть полезен также слушателям факультетов повышения квалификации преподавателей, инженерам, конструкторам.

Приобрести книгу можно непосредственно в издательстве "Машиностроение", прислав заявку в отдел подписки, маркетинга и рекламы по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru; по почте: 107076, Москва, Стромынский пер., 4. ООО "Издательство Машиностроение".
Справки по тел. (499) 269-66-00.
http://www.mashin.ru

Н.Б. Годунов *(Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова)*

Расчет перемещаемого объема металла при восстановлении профилирующей накаткой втулок карданных передач*

Рассмотрена методика расчета объема металла и конструктивно-технологических параметров напряженно-деформированного состояния, необходимых для восстановления сложнопрофильной шлицевой поверхности втулки карданной передачи пластической деформацией.

Article discusses calculation method of metal volume and constructively-technological parameters of deflected mode needed for restoring of conplex contour profile spline surface of drive line bush by plastic deformation.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, шлицевая поверхность, карданная передача, пластическая деформация.

Key words: deflected mode, spline surface, gimbal drive, plastic deformation.

Наибольшая интенсивность износов шлицев втулки наблюдается на поверхностях, непосредственно передающих крутящий момент. Износ шлицев по длине неравномерен, что характерно для передач с переменной длиной зацепления при работе мобильной техники. Наиболее активны контактные напряжения $\sigma_н = 3 \cdot 10^3$ МПа. Повышенные износы шлицев резко меняют характер работы сопряжения, интенсифицируют динамические нагрузки.

Проведенные расчеты показали на значительное, заложенное в конструкции зацепления, превышение прочности втулки, что позволяет при восстановлении использовать горячую пластическую деформацию с перемещением запасов металла с нерабочих поверхностей на восстанавливаемые шлицы. При этом исходя из износного состояния рассчитывают перемещаемые объемы металла, необходимые в последующем для конструирования деформирующих элементов оснастки [1].

Величина перемещающего объема металла, необходимого для восстановления шлицевых поверхностей, обуславливается объемом изношенной поверхности и объемом, необходимым для последующей механической обработки [2].

Расчет объема металла ведут из условия изменения конструктивных размеров изношенного радиуса шлицевой поверхности $R_и$, мм (рис. 1):

$$R_и = R_1 + a\cos^2 \pi\varphi, \qquad (1)$$

где R_1 – внутренний диаметр шлицев, мм;

a – высота шлица мм;

φ – переменный угол, зависящий от расположение текущей точки относительно вертикальной оси.

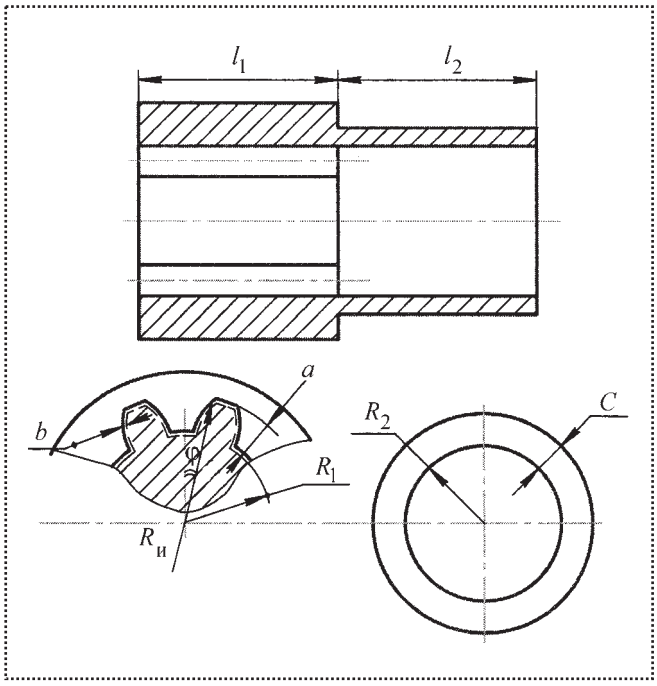


Рис. 1. Схема для расчета потребного для восстановления втулки объема металла

*По материалам 10-й Международной научно-практической конференции "Технологии ремонта, восстановления и упрощения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки". С.-Петербург. 15–18 апреля 2008.

Уравнение, приближенно описывающее изменение радиуса шлицевой втулки, мм, с учетом устранения величины износа и создания припуска на механическую обработку, имеет вид

$$R_в = (R_1 + b) + a\cos^2 \varphi, \qquad (2)$$

где b – суммарный размер величин износа и припуска на механическую обработку.

Тогда исходя из выражений (1) и (2) объем металла, мм^3, необходимый для формирования шлицевой части втулки l_1 примет вид

$$V_1 = \pi b l_1 (2R_1 - b + a). \qquad (3)$$

Объем металла, мм^3, необходимый для формирования изношенных размеров гладкой части втулки l_2, запишется как

$$V_2 = \pi b l_2 (2R_2 + c), \qquad (4)$$

где R_2 – радиус гладкой части втулки с припусками на устранение износа и припуском на механическую обработку, мм;

c – припуск на устранение износа и на механическую обработку, мм.

Суммарный объем металла, мм^3, необходимый для восстановления всей втулки, имеет вид

$$V_{1,2} = \pi[b l_1 (2R - b + a) + c l_2 (2R_2 + c)]. \qquad (5)$$

Выражением (5) определяют объем перемещаемого металла, необходимый для восстановления шлицевой втулки.

При проектировании деформирующих элементов оснастки объем металла переносят в линейные размеры, обеспечивающие нужное приращение размеров восстанавливаемых поверхностей.

Для перемещения рассчитанного объема металла необходимы силы, обеспечивающие оптимальную как с точки зрения технологичности, так и с позиции качества пластическую деформацию материала детали.

Известно, что условное напряжение, характеризующее напряженно-деформированное состояние, есть частное от силы деформации на площадь поперечного сечения в любой момент деформирования поверхности, МПа:

$$\sigma_у = P/F_0. \qquad (6)$$

Силу деформации выражают произведением напряжения текучести материала и площади поперечного сечения деформируемого тела, Н:

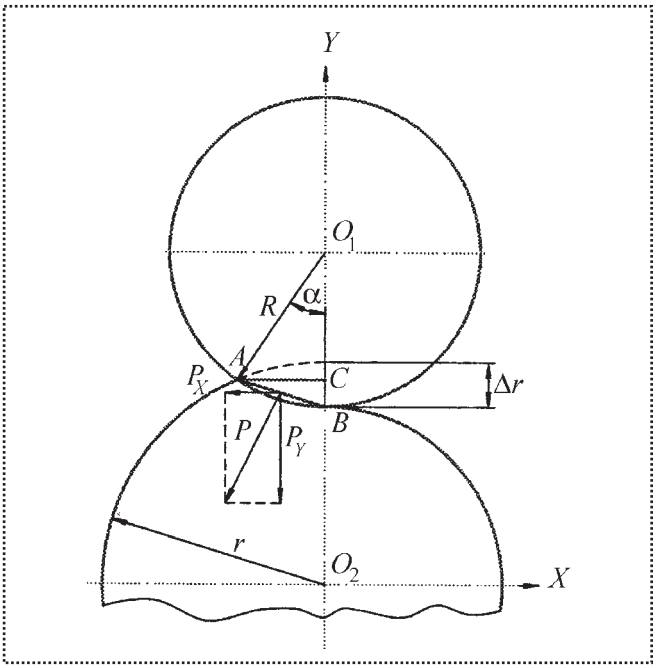


Рис. 2. Схема для расчета силы деформации при поперечной накатке шлицевой втулки роликом

$$P = \sigma_s F_0. \qquad (7)$$

При анализе схемы деформации шлицевой втулки (рис. 2) следует, что зона контакта, мм, деформирующего ролика с наружной поверхностью втулки может быть рассчитана выражением

$$AB = 2R\sin(\alpha/2). \qquad (8)$$

Площадь проекции деформирующего ролика на поверхность восстанавливаемой втулки описывают выражением, мм^2:

$$S = 2Rh\sin[1/2\arcsin(1/R)\sqrt{(2Rr\,\Delta r/R + r)}], \qquad (9)$$

где h – ширина линии контакта деформирующего ролика с поверхностью втулки, мм;

R –радиус деформирующего ролика, мм;

r – радиус внешней поверхности шлицевой втулки, мм;

Δr – величина уменьшения радиуса внешней поверхности при восстановлении, мм.

Исходя из выражений (7) и (9) сила, необходимая для перемещения металла с внешней поверхности втулки к восстанавливаемым шлицам на величину Δr, может быть рассчитана выражением, Н:

$$P = 2Rh\sigma_s \sin[1/2\arcsin(1/R)\sqrt{(2Rr\,\Delta r/R + r)}]. \qquad (10)$$

Соответственно, проекции силы P на оси X и Y составляют:

$$P_X = P\sin(\alpha/2) = 2Rh\sigma_s \times \times \sin^2[(1/2)\arcsin(1/R)\sqrt{(2Rr\Delta r/R+r)}], \quad (11)$$

$$P_Y = P\cos(\alpha/2) = h\sigma_s\sqrt{(2Rr\Delta r/R+r)}. \quad (12)$$

С помощью выражения (5) рассчитывают объем металла, перемещаемого при пластической деформации внешней нерабочей поверхности шлицевой втулки к восстанавливаемым шлицам. Исходя из рассчитанного объема металла устанавливают конструктивные размеры деформирующих и профилирующих роликов оснастки.

Повышенные прочностные показатели деформирующей оснастки и рациональные энергосиловые параметры процесса накатки определяют выражениями (10)–(12).

Библиографический список

1. **Рудик Ф.Я., Годунов Н.Б., Богатырев С.А.** Восстановление полых длинномерных шлицевых деталей калибрующей накаткой. Рекомендации МСХ Саратовской области. Саратов: ГСХА, 1997. 29 с.

2. **Сторожев М.В., Попов Е.А.** Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.

В.А. Мамонтов, Ю.В. Чеботарёв, Н.В. Куличкин
(Астраханский государственный технический университет)

Восстановление деформированных судовых валов термомеханической правкой на основе ползучести*

Представлены теоретические основы термомеханической правки на основе ползучести и результаты экспериментальных исследований образцов, подвергнутых правке этим способом, на усталостные характеристики при симметричном цикле изменения напряжений консольным изгибом. Проведен анализ полученных экспериментальных данных, показывающий практическую неизменность усталостных характеристик круглых образцов, подвергнутых правке.

Theoretical bases of thermomechanical editing on the basis on creep and results of experimental researches of samples subjected are submitted to editing by this way on fatigue characteristics at a symmetric cycle of change of stress by a console blend. The analysis of the received experimental data showing a practical invariance of fatigue characteristics of round samples, subjected to correcting is curried out.

Ключевые слова: судовой вал, теоретические основы, ползучесть, правка.

Key words: ship's shafts, theoretical bases, creep, correcting.

Судовые валы являются ответственными элементами судовой энергетической установки. К ним предъявляют высокие требования по надежности и долговечности как при изготовлении, так при эксплуатации и ремонте.

Во время эксплуатации судовые валы с прямолинейной осью в силу различных причин приобретают остаточные деформации в виде искривления оси. Как показывает опыт, величины деформаций часто превышают предельные нормы, при которых их техническое использование недопустимо. Высокая стоимость изготовления валов делает актуальной проблему восстановления их работоспособности.

В судоремонте устранение прогибов валов осуществляют правкой различными способами. Эти способы достаточно известны и описаны в технической литературе. Научного обоснования эти сведения не имеют и во многом противоречивы. Поэтому рекомендуемые в литературе способы правки валов часто не обеспечивают требуемые нормативными документами надежность и долговечность валов в эксплуатации после правки. Следует отметить высокую трудоемкость рекомендуемых способов правки и нестабильность формы валов после правки по этим рекомендациям, а также снижение усталостной прочности валов после правки.

На основе анализа литературы предложен *способ термомеханической правки валов на основе явления ползучести*. Правка этим способом заключается в том, что вал устанавливают на опоры и на участке

*По материалам 10-й Международной научно-практической конференции "Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механизмов, оборудования, инструмента и технологической оснастки". С.-Петербург, 15–18 апреля 2008.

его максимального искривления подвергают нагреву по всей окружности до температуры 600...650 °С. Затем при помощи нажимного приспособления создают упругий прогиб в сторону, противоположную имеющемуся искривлению, с последующей выдержкой в нагруженном состоянии. Количество нажимов определяют по результатам первого нажима.

При создаваемой нагрузке на вал в процессе правки и повышенной температуре в течение некоторого времени часть упругой деформации переходит в пластическую. Какая часть упругой деформации перейдет в пластическую, зависит от релаксационных характеристик материала вала, которые косвенно учитывают явление ползучести – пластической деформации во времени, являющейся первоосновой процесса выправления вала.

Для установления аналитической зависимости между параметрами правки с учетом ползучести, такими как стрелка прогиба, температура нагрева, величина нагрузки, и коэффициентами жаропрочности материала валов при заданной температуре использована теория ползучести – теория упрочнения. В теории упрочнения предполагают, что при фиксированной температуре существует зависимость между деформацией $\varepsilon_п$ ползучести, ее скоростью $\dot{\varepsilon}_п$ и напряжением σ. Основное уравнение в степенной форме записывают:

$$\dot{\varepsilon}_п \varepsilon_п^{\alpha} = \gamma \sigma^{\beta}, \qquad (1)$$

где α, β, γ – коэффициенты жаропрочности, определяемые с помощью кривых ползучести.

При условии, когда напряжение и температура постоянны во времени, выражение (1) имеет вид

$$\varepsilon_п = [(1+\alpha)\gamma\sigma^{\beta} t]^{\frac{1}{1+\alpha}}, \qquad (2)$$

где t – время выдержки под нагрузкой в процессе правки.

Максимальное значение начального прогиба f (t = 0) согласно расчетной схеме правки вала (рис. 1) вычисляют по формуле

$$f = \frac{Pbz}{6EJl}(z^2 - l^2 + b^2) - \frac{P(z-a)^3}{6EJ}, \qquad (3)$$

где P – сила, создаваемая при правке;

a – расстояние от левой опоры до точки приложения нагрузки;

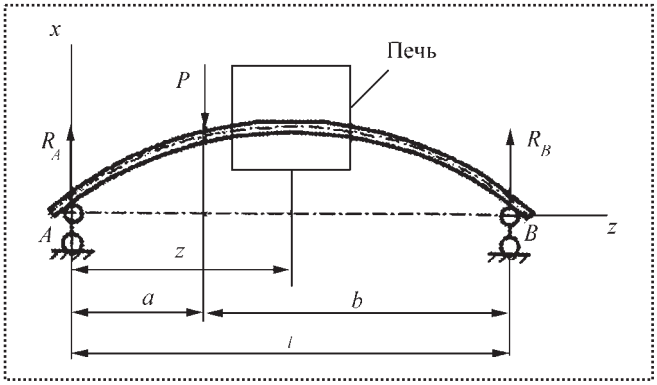


Рис. 1. Схема правки вала

b – расстояние от правой опоры до точки приложения нагрузки;

E – модуль упругости материала вала при температуре правки;

J – момент инерции сечения вала в месте максимального прогиба;

z – расстояние от левой опоры до места максимального прогиба вала;

l – длина вала.

В произвольный момент времени ($t > 0$) прогиб будет складываться из упругого прогиба и прогиба, обусловленного ползучестью материала:

$$f(z, t) = f(z, 0) + f_п(z, t). \qquad (4)$$

Прогиб, вызванный ползучестью вала, описывают уравнением:

$$f_п = AJ_{пр}^{-\beta/(1+\alpha)} t^{1/(1+\alpha)} B\left(\frac{Pa}{l}\right)^{\beta/(1+\alpha)} \times$$
$$\times\left[(l-z)^{\frac{C}{B}} - zb^{\beta/(1+\alpha)}(a^2+b^2)\times\right. \qquad (5)$$
$$\left.\times\frac{AJ_{пр}^{-\beta/(1+\alpha)} t^{1/(1+\alpha)} Cl(1+l)}{AJ_{пр}^{-\beta/(1+\alpha)} t^{1/(1+\alpha)} Cl(l-1)+a}\right],$$

где $J_{пр} = 4\int_0^{\frac{d}{2}} x^{(1+\alpha+\beta)/\beta}\sqrt{\left(\frac{d}{2}\right)^2 - x^2}\,dx$ – "обобщенный" момент инерции поперечного сечения вала;

d – диаметр вала;

$$A = [(1+\alpha)\gamma]^{1/(1+\alpha)};$$

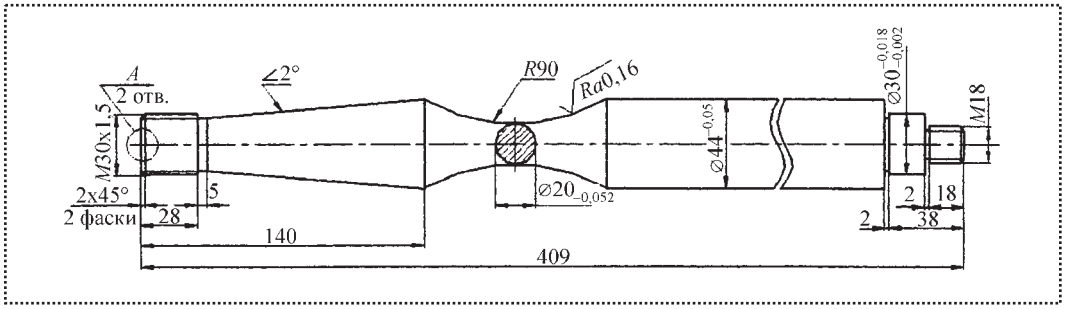


Рис. 2. Экспериментальный образец

$$B = \frac{(1+\alpha)^2}{(1+\alpha+\beta)(2+2\alpha+\beta)};$$

$$C = \frac{1+\alpha}{1+\alpha+\beta}.$$

Полученная аналитическая зависимость (5) между стрелкой прогиба от силы при правке с учетом явления ползучести – пластической деформации во времени с постоянным температурным режимом и создаваемой нагрузкой в зависимости от геометрических параметров вала позволяет определить величину выправления вала за счет ползучести при заданном времени правки.

Для построения экспериментальных кривых ползучести и определения коэффициентов жаропрочности α, β, γ, входящих в уравнение теории упрочнения (1), была проведена правка экспериментальных образцов. Конструкция и размеры образцов выбраны с учетом последующих испытаний на изгибную выносливость (рис. 2). Исходной заготовкой является прокат круглый из стали 35 по ГОСТ 1050–88. Поковки изготовлены в соответствии с ГОСТ 8536–79. Механические свойства поковок соответствуют КМ 28, IV группа.

На основании экспериментальных данных построены экспериментальные кривые ползучести в координатах прогиба f от времени t (рис. 3), с помощью которых определены коэффициенты жаропрочности: $\alpha = 5{,}31$; $\beta = 6{,}05$ и $\gamma = 10^{-71{,}89}$.

Используя формулу (2) и полученные коэффициенты, получают теоретические кривые ползучести, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными (см. рис. 3).

Используя значения коэффициентов α, β, γ и зависимость (5), получено выражение для определения прогиба в процессе правки, вызванного ползучестью при температуре 650 °С:

$$f_{\text{п}} = 9{,}35\cdot 10^{-13} J_{\text{пр}}^{-0{,}96} t^{0{,}17} \frac{Pa}{l} \times \left[(l-z)^{2{,}96} - z b^{0{,}96} (a^2+b^2) \times \left(\frac{1+l}{l + \dfrac{a}{2{,}77\cdot 10^{-12} J_{\text{пр}}^{-0{,}96} t^{0{,}17} l} - a} \right) \right]. \quad (6)$$

На основании зависимости (6) разработаны режимы и проведена опытная правка четырех серий образцов со стрелками прогиба 1, 3, 4 и 5 мм по 24 образца в каждой серии. *Анализ результатов опытной правки образцов показал, что расчетные значения устраняемого прогиба в процессе правки, полученные на основании вышеприведенных аналитических зависимостей, хорошо согласуются с экспериментальными данными.*

Основной эксплуатационной характеристикой, обеспечивающей надежность валов при эксплуата-

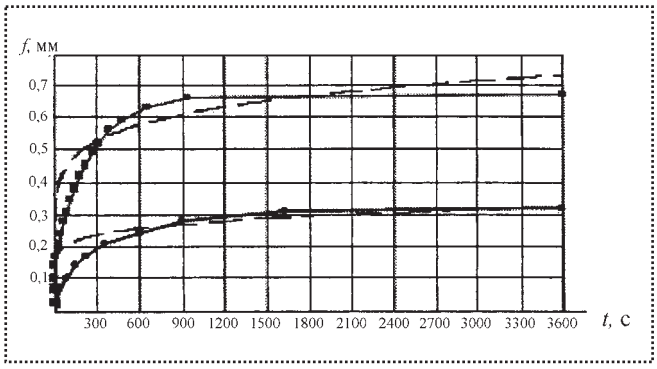


Рис. 3. Кривые ползучести образцов:
—— – экспериментальные; – – – – теоретические; ■ – σ = = 78 МПа; ● – σ = 39 МПа

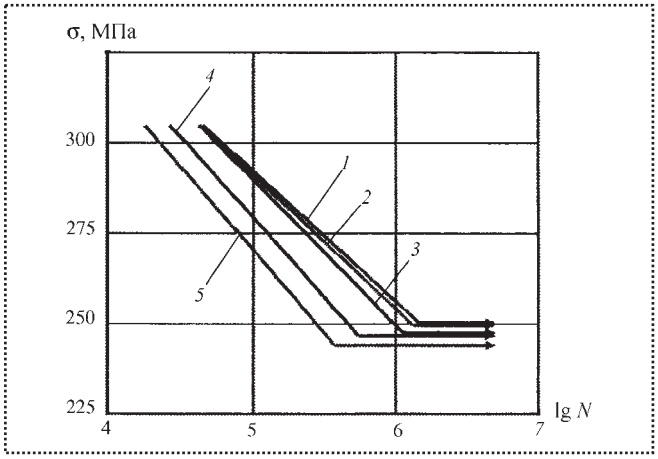


Рис. 4. Кривые усталости недеформированных (контрольных) образцов и выправленных образцов со стрелками прогиба *f* = 1, 3, 4, 5 мм:
1 – недеформированные образцы; *2* – образцы со стрелкой прогиба 1 мм; *3* – образцы со стрелкой прогиба 3 мм; *4* – образцы со стрелкой прогиба 4 мм; *5* – образцы со стрелкой прогиба 5 мм

ции, является изгибная усталостная прочность. В связи с этим были проведены сравнительные усталостные испытания серий контрольных (недеформированных) образцов и образцов, выправленных данным способом правки со стрелками прогиба 1, 3, 4 и 5 мм (по 24 штуки в каждой серии). Образцы испытывали по симметричному циклу изменения напряжений консольным изгибом на базе 10 млн циклов. Определение пределов выносливости образцов произведено методом "лестницы".

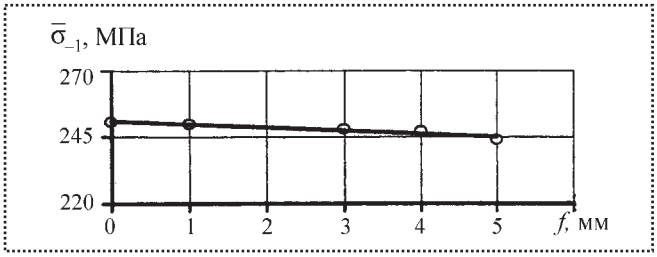


Рис. 5. Зависимость предела выносливости экспериментальных образцов от стрелки прогиба

Кривые усталости недеформированных (контрольных) и выправленных образцов с различными стрелками прогиба представлены на рис. 4. Зависимость средних значений пределов выносливости при симметричном цикле от стрелки прогиба представлена на рис. 5.

Для выправленных образцов со стрелками прогиба 1, 3, 4 и 5 мм отмечается небольшое снижение пределов выносливости на 0,3; 1,2; 1,4 и 2,6 % соответственно, что практически незначительно.

Вывод

Анализ полученных экспериментальных данных показал практическую неизменность усталостных характеристик образцов, подвергнутых термомеханической правке на основе ползучести, по режимам, определенным с помощью представленных выше аналитических зависимостей. На основе результатов исследований разработана технология термомеханической правки натурных судовых валов на основе ползучести.

М.В. Вартанов, *д-р техн. наук (МГТУ "МАМИ"),* ***А.А. Гусев,*** *д-р техн. наук (МГТУ "СТАНКИН")*

Международный научно-технический семинар "Современные технологии сборки"

23–24 октября в МГТУ "МАМИ" состоялся научно-технический семинар "Современные технологии сборки". Семинар был организован МГТУ "МАМИ", МГТУ "СТАНКИН", Ковровской государственной технологической академией им. В.А. Дегтярева и журналом "Сборка в машиностроении, приборостроении".

В работе семинара приняли участие также ученые и специалисты Московского государственного открытого университета, Рыбинской государственной технологической академии, Российского государственного университета технологий и сервиса, Калужского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана, Самарского государственного технологического университета, Севастопольского национального технического университета, Читинского технического университета, Камской государственной инженерно-экономической академии, Пензенского втуза, ГКНПЦ им. М.В. Хруничева, Университета г. Руссе (Болгария), Жешувского технологического университета (Польша), ФГУП "НПО "Техномаш", Полоцкого государственного университета, г. Новополоцк (Беларусь), Иркутского государственного технического университета.

Председатель оргкомитета – д-р техн. наук, профессор М.В. Вартанов, заместитель председателя – доктор технических наук, профессор А.А. Гусев.

С приветственной речью выступил проректор МГТУ "МАМИ" по научной работе, профессор, доктор технических наук С.В. Бахмутов. Было сделано 16 докладов по тематике семинара.

Тематика семинара включала в себя следующие разделы:

1. Современные методы сборки.
2. Автоматизация сборочных работ.
3. Обеспечение качества сборки.

По первому разделу сделал доклад "Высокоэффективное решение проблемы серийной автоматической сборки изделий на основе целенаправленного построения комплекта связей, обеспечивающего многократное увеличение допусков сборочной системы" профессор, д-р техн. наук А.А. Гусев. В выступлении было изложено одно из решений актуальной проблемы машиностроения – автоматической серийной сборки изделий, а также освещен опыт внедрения систем на отечественных предприятиях страны и за рубежом.

В докладе на конкретных примерах показано, что дорогостоящие сборочные машины не всегда эффективны. Не всегда эффективным оказывается и учет требований технологичности (например, введение заходных фасок, так как и они могут привести к заклиниванию). Решение проблемы автор видит в создании автоматических универсальных сборочных систем, пригодных для высокоэффективного многономенклатурного серийного производства изделий стабильного качества с переналадкой технологических средств оснащения в кратчайший срок.

Адаптивный принцип работы сборочных устройств, базирующие элементы которых изменяют свое положение в зависимости от конфигурации и размеров поступающих на сборку деталей, позволяет осуществлять автоматическую переналадку оборудования на сборку различных изделий. Такие универсальные автоматические сборочные устройства были созданы в "СТАНКИНе" и запатентованы в ряде промышленно-развитых стран.

С докладом о развитии работ в области технологии сборочного производства выступил заведующий кафедрой "Технология машиностроения" МАМИ профессор, д-р техн. наук Б.В. Шандров. В его докладе были изложены результаты научно-практических работ по обеспечению качества сборки редукторов автомобилей, технологичности конструкций изделий при автоматической сборке, по сборке с использованием клеев и вибросборке.

В докладе профессора, д-ра техн. наук А.Б. Тулинова (Московский государственный университет сервиса) рассмотрены результаты экспериментов по исследованию свойств некоторых отечественных и зарубежных анаэробных материалов в узлах и агрегатах работающих в жидкостных и агрессивных средах. Установлены значения прочности и набухания анаэробных продуктов в морской воде, топливе и масле, подтверждены их антикоррозионные свойства. Эксперименты показали высокую стойкость анаэробных продуктов к различным жидкостям и агрессивным средам, что обеспечивает возможность их применения в различных конструкциях, работающих в этих средах.

Особенности сборки цилиндрических соединений с натягом комбинированным клеетепловым методом были рассмотрены в докладе Д.В. Князева (ГКНПЦ им. М.В. Хруничева); приведено описание комбинированного клее-теплового метода выполнения поперечно-прессовых соединений с натягом, изложены результаты экспериментальных исследований на образцах с номинальным диаметром 60 мм и натягом 0,01...0,07 мм. Доказано, что комбинированный клеетепловой метод дает соединения, равные по прочности соединениям, полученным тепловым методом, но при натяге в 2...8 раз меньше.

По разделу "Автоматизация сборочных работ" ряд докладов был посвящен автоматической сборке различных видов соединений и автоматическому оборудованию для их выполнения. Наиболее интересные из них были сделаны представителями Ковровской научной школы (руководитель – профессор, д-р техн. наук Ю.З. Житников). В своем докладе Д.С. Воркуев обосновал кинематическую схему многошпиндельного шпильковерта, обеспечивающего качественную и надежную сборку и рассказал о разработанной функциональной схеме его итерационной адаптивной системы. Система управления автоматизированной сборкой имеет два канала управления крутящим моментом и уг-

ловой скоростью рабочего органа: грубый – для обеспечения большого угла поворота детали и точный – для обеспечения требуемого момента затяжки соединения.

В докладе А.А. Шмагина предложен метод расчета предельно допустимой частоты вращения резьбовой детали для момента начала затяжки резьбового соединения.

В докладе аспиранта МГТУ "МАМИ" Е.И. Кольчугина была представлена экспериментальная установка для исследования нового метода роботизированной сборки на основе пассивной адаптации и низкочастотных колебаний. В данном методе исследуется возможность сборки без жесткого базирования деталей с использованием адаптивного захвата и виброопоры для базовой детали.

Вопросы предпроектного расчета параметров технологического оборудования сборочного производства рассмотрены в докладе доцента И.И. Ламина (МГТУ "МАМИ"). Основная цель метода – получение основных технических и экономических параметров технологического процесса и специализированного сборочного оборудования без трудоемкой и дорогостоящей процедуры проектирования вариантов процессов и компоновок оборудования.

В докладе И.В. Бухтеевой (МГТУ "МАМИ") изложены вопросы предварительного выбора и оптимизации надежности автоматического сборочного оборудования. Важно на стадии проектирования автоматизированных сборочных линий выбрать оптимальный уровень надежности сборочного оборудования, при котором все затраты, связанные с его эксплуатацией и производством, будут минимальными. В данной работе задача определения оптимальной надежности сборочного модуля решается методом выбора рационального распределения надежности по отдельным составляющим модуля, механизмам и узлам.

Работа, представленная Н.С. Григорьевой, связана с развитием научных основ автоматизации модульных процессов гибкого сборочного производства на базе современных сборочных технологий и высокоэффективного переналаживаемого модульного оборудования и оснастки. Создана комплексная модель процесса гибкой автоматической модульной сборки как совокупности всех видов связей, действующих при переналадке технологии и конструкции оборудования.

Особенности автоматизации сборки в условиях гибкого производства рассматривались также в докладе Е.Н. Малышева (Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана). В частности, анализируется эффективность спроектированной сборочной системы с точки зрения ее производительности. Определена зависимость такта выпуска изделий от величины партии изделий, времени переналадки системы и времени устранения сбоев.

Третья группа докладов освещала решение вопросов качества сборки. Наиболее системно вопросы технологического обеспечения качества изделий в сборочном производстве рассмотрены в докладе д-ра техн. наук А.В. Медаря (ФГУП "НПО Техномаш"). Автором предложена для обсуждения концепция системного рассмотрения точностных взаимосвязей объекта "изделие–технология–оборудование", направленная на разработку общей методологии создания технологического объекта, включающей разделы точностного анализа процесса формирования выходных параметров точности по сборочным операциям и технологического синтеза процессов и оборудования сборочного производства изделий.

В докладе И.К. Рыльцева (Самарский государственный технический университет) рассмотрены вопросы обеспечения качества сборки узла штуцера тепловых подогревателей, технология сборки методом регулировки узла штуцера, позволяющая определить оптимальное пространственное расположение сопрягаемых деталей. Разработанная методика позволяет на этапе сборки прогнозировать КПД изделия.

В работе профессора, д-ра техн. наук В.В. Непомилуева и аспирантки Е.А. Майоровой (Рыбинская государственная авиационная технологическая академия им. П.А. Соловьева) освещены вопросы повышения качества сборки изделий путем совершенствования метода индивидуального подбора деталей для изделий, содержащих многозвенные размерные цепи. Разработан алгоритм, позволяющий при небольшой трудоемкости подбора деталей обеспечивать качество сборки изделия, близкое к максимально теоретически достижимому. Использование данного метода дает возможность обеспечивать требуемое качество с минимальными затратами.

Вопросы обеспечения надежности и качества резьбовых узлов рассматривались в докладе А.В. Ланщикова и А.А. Селиверстова (Пензенская государственная технологическая академия). Показаны технологические возможности контрольно-диагностических стендов для использования на стадии подготовки сборочных операций в целях повышения качества сборки резьбовых узлов.

На семинаре были сделаны доклады, касающиеся испытательного оборудования. Так, например, в докладе В.Б. Хлюпина (Камская государственная инженерно-экономическая академия) была описана сборка моторного стенда для испытания дизельного двигателя на токсичность, экономичность и мощность, оценки теплового баланса при впрыскивании воды во впускной коллектор. Даны рекомендации по выбору приборов для измерения этих показателей.

Был заслушан ряд докладов, в которых рассматривались вопросы влияния качества сборки изделий на процессы их функционирования. Так, например, в работе С.В. Толоконникова (Самарский государственный технический университет) описывается методика разработки эвристической модели точечных процессов капельных вихревых потоков в закрытом интервале кольцевого зазора узла штуцера теплового подогревателя и определяется влияние погрешности кольцевого зазора узла штуцера на точечные процессы капельных потоков тепловых подогревателей.

В докладе д-ра техн. наук, профессора В.А. Шабайковича (Жешувский технологический университет, Польша) изложены методы определения предварительной оценки качества и конкурентоспособности изделий, которые запускаются в гибком производстве. Рассмотрены влияние различных факторов гибкого производства, как влияние производственных затрат, показателей качества, стоимости эксплуатации и рыночной цены, управления и маркетинга. Проанализирован механизм формирования конкурентоспособности изделий.

Материалы Международного научно-технического семинара "Современные технологии сборки" будут опубликованы в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении".

РЕШЕНИЕ
Международного научно-технического семинара "Современные технологии сборки"

На современном этапе развития машиностроения обеспечение качества изделий является наиболее актуальной задачей. Сборка является заключительным и наиболее ответственным этапом формирования качества изделий. Отмечая долю сборки в структуре трудоемкости изделий машиностроения (до 40 %) и приборостроения (до 70 %), участники семинара *считают целесообразным сосредоточить дальнейшие исследования по следующим наиболее актуальным направлениям*:

- обеспечение технологичности конструкций изделий и их экономичности;
- достижение точности изделий на основе моделирования сборочных процессов;
- разработка и внедрение средств пассивной и активной адаптации сборки;
- разработка способов сборки на основе самопереналаживающейся, типовой и модульной технологической оснастки и модернизации существующего оборудования;
- исследования в области нетрадиционных видов соединений;
- разработка теории надежности сборочных процессов;
- создание новых методов и средств контроля и испытаний собранных изделий.

Учитывая важность сборочного производства в вопросах обеспечения качества изделий, участники семинара постановили:

1. В соответствии с основными задачами Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы" рекомендовать инженерным вузам создание научно-образовательных центров по приоритетным направлениям технологии сборки в целях объединения научных коллективов на выполнение крупных проектов и финансовой поддержки системы подготовки инженерных и научных кадров.

2. Рекомендовать инженерным вузам введение в учебный процесс дисциплин, связанных с вопросами технологии и автоматизации сборки.

3. Обратиться в Министерство промышленности и торговли Российской Федерации и Ассоциацию "Станкоинструмент" с предложением изучения целесообразности создания в России предприятия, специализирующегося на выпуске оборудования для сборочного производства и технологической оснастки.

4. Учитывая значимость сборочного производства в вопросах обеспечения качества продукции, обратиться в Министерство образования России с предложением открытия новой специальности "Технология сборочного производства".

5. Распространить материалы семинара на машиностроительных и приборостроительных предприятиях России в целях внедрения в производство прогрессивных процессов сборки и технических решений.

6. Опубликовать отчет о проведении семинара в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении".

7. Учитывая острую потребность в технической литературе, рекомендовать специалистам вузов активизировать работу по подготовке и изданию учебной литературы для среднего и высшего профессионального образования.

8. Обеспечить проведение подобных семинаров по вопросам сборки на базе МГТУ "МАМИ" на регулярной основе.

Оргкомитет семинара

Фоторепортаж о Международном научно-техническом семинаре "Современные технологии сборки" см. 2 стр. обложки.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".
Адрес электронной почты издательства: **E-mail: mashpubl@mashin.ru**; редакции журнала: **sborka@mashin.ru; http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.
Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 08.10.08 г. Подписано в печать 27.11.08 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,23. Заказ 1214. 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.