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 2016 (197)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологическая оснастка для сборки

Шаломов В.И. Исследование влияния конструктивных особенностей газовых опор на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков (ч. 1) 3

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Клычев А.А. Необходимые и достаточные условия надежного закрепления заготовки в трехкулачковом патроне при токарной обработке на станках с ЧПУ 7

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Особенности индукционной пайки 10

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Емельяненко А.А. Особенности виброизоляции приборов гидроакустической связи на вертикальном фундаменте 22

Разборка. Ремонт

Казанцев В.Ф., Нигметзянов Р.И., Сундуков С.К., Фатюхин Д.С. Применение ультразвуковых колебаний различной поляризации при проведении разборочных операций 25

Соединение деталей машин

Давлетшин И.А., Медарь А.В., Барон К.А., Чернышов С.В. Конструктивно-технологическое обеспечение собираемости и взаимозаменяемости агрегатов изделий по фланцевым стыкам 29

Трение и смазка в машинах и механизмах

Долгополов К.Н., Колесников И.В. Исследования состава нефтяных остатков как перспективного сырья производства масел 33

Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Гашение фрикционных автоколебаний с учетом двух направлений колебаний инструмента 38

Портнов С.В., Подкользина Л.В., Яковлев С.Н. Основные виды износа современных конструкционных полиуретанов 40

Дубовик Е.А., Мищиненко В.Б. Определение нормативов срока службы восстановленных моторных масел в двигателях внутреннего сгорания машин 44

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

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

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

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

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОМСК

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

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в РОСКОМНАДЗОРе. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

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

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

12 2016 (197)

CONTENTS

Technological equipment for assembly

Shalomov V.I. Research of influence of design features of gas bearings on operational characteristics of spindle assemblies of machine tools 3

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Klychev A.A. Necessary and sufficient conditions of reliable fixing of preparation in the three-cam draw-in attachment when turning on machines with computer numerical control 7

Assembly welding works. Soldering

Bokhorov I.O., Karabanov V.V. Features induction brazing 10

Quality assurance. Testing. Monitoring

Emelyanenko A.A. Features vibration isolation devices hydroacoustic communication on vertical base 22

The dismantling. Repair

Kazantsev V.F., Nigmetzyanov R.I., Sundukov S.K., Fatyukhin D.S. The application of ultrasonic vibrations with different polarizations in the implementation of deconstruction operations 25

Connection of mashines parts

Davletshin I.A., Medar A.V., Baron K.A., Chernyshov S.V. Constructional technological ensuring assimilability and interchangeability units' productions all along flanged junctions 29

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Dolgopolov K.N., Kolesnikov I.V. Investigations composition of petroleum residues as perspective raw material oil production 33

Izrailovich M.Ya., Erlikh B.M. Damping of self oscillations with mutually directions of two tool paths 38

Portnov S.V., Podkolzina L.V., Yakovlev S.N. Main type of wear of modern constractive polyurethane 40

Dubovik E.A., Michinenko V.B. Definition of standards of life restored motor oils in internal combustion engines of cars 44

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

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

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

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTYUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

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

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

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland

P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

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

The journal is registered by ROSKOMNADZOR.
Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

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

УДК 621.822.57-229.331

В.И. Шаломов, *канд. техн. наук*
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)
E-mail: seu@knastu.ru

Исследование влияния конструктивных особенностей газовых опор на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков (ч. 1)

Рассмотрены результаты численного исследования влияния характерных особенностей газостатических опор с пористыми вставками на эксплуатационные характеристики шпиндельных узлов металлообрабатывающих шлифовальных станков при работе в статическом и гибридном режимах. В качестве определяющего геометрического размера для расчетного анализа выбрано удлинение пористых вставок газовой опоры.

The results of numerical investigation of influence of characteristic features of gas-static bearings with porous inserts on operational characteristics the spindle assemblies of metal-working grinders are considered during the work in the static and hybrid modes. As the defining geometric size for numerical analysis of the selected elongation of the porous inserts gas support.

Ключевые слова: металлообрабатывающий станок, шпиндельный узел, газостатические опоры, пористые вставки, эксплуатационные характеристики шпиндельного узла, конструктивный параметр, число сжимаемости, несущая способность и удельный момент опоры, нагрузка и жесткость на консоли шпинделя, угол ориентации нагрузки.

Keywords: machine tool, spindle unit, gas-static support, a porous insert, the operational characteristics of spindle unit with a design parameter, the number of compressibility, bearing capacity and specific support point, the load and the rigidity in the spindle, the orientation angle of the load.

Точность обработки деталей на металлообрабатывающем шлифовальном станке напрямую зависит от эксплуатационных характеристик шпиндельного узла (ШУ). ШУ на газовых опорах позволяют достигать высоких скоростей шлифовального круга. Скоростной параметр ШУ с подшипниками качения $dn = 1 \cdot 10^6$ мм·мин$^{-1}$, а с воздушными опорами $dn = 2{,}5 \cdot 10^6$ мм·мин$^{-1}$.

Выполнили численные исследования влияния геометрических и режимных параметров газостатических опор с пористыми вставками на эксплуатационные характеристики ШУ.

Основные эксплуатационные характеристики ШУ для исследования — относительная нагрузка $\bar{F}$ на консоли шпинделя, коэффициент несущей способности опор C_Q, коэффициент жесткости $k_{\bar{F}}$, удельный момент подшипника $\bar{M}$ и для комбинированного режима дополнительно — угол ориентации нагрузки ψ [1].

Исследовали критерии подобия газовых опор. В качестве определяющих параметров применили такие комплексные числа, как конструктивный параметр и число сжимаемости [2].

Конструктивный параметр K_C при статических режимах работы шпинделя вычислили по выражению

$$K_C = c\sqrt[3]{\frac{\delta}{12 k_p R}},$$

где c — средний радиальный зазор, м;

δ — высота пористой вставки, м;

k_p — коэффициент проницаемости пористой вставки [3];

R — радиус подшипника, м.

На значение K_C прямо пропорционально влияет увеличение или уменьшение среднего радиального зазора газовой опоры.

Число сжимаемости Λ для эксплуатационных характеристик газовых опор при вращении шпинделя

$$\Lambda = \frac{6\mu R^2\omega}{p_s c^2},$$

где μ — коэффициент динамической вязкости, Па·с;

ω — угловая скорость шпинделя, рад/с;

p_s — абсолютное давление наддува подшипников, Па.

При сохранении постоянными геометрических размеров опоры R и c, давления наддува газовой смазки p_s и вязкости газовой среды μ число сжимаемости является безразмерным выражением частоты вращения (угловой скорости) шпинделя.

Расчеты эксплуатационных характеристик ШУ выполняли для двух режимов работы шпинделя: статического (режима подвеса) и гибридного (комбинированного) [4]. Эффективность смазки газовой опоры в статическом режиме обусловлена внешним наддувом газа. Отличительная особенность гибридного режима — наличие эффекта самогенерации давления или эффекта смазочного клина. С учетом внешнего наддува это приводит к дополнительному сжатию газа в смазочном слое и такому распределению давления, в результате которого несущая способность подшипника увеличивается.

Один из геометрических параметров газостатических опор, оказывающих заметное влияние на эксплуатационные параметры пневмошпинделя, — линейные размеры пористых вставок. При работе шпинделя в состоянии подвеса влияние удлинения пористых вставок подшипников на эксплуатационные характеристики рассматривали в условиях изменения конструктивного параметра (среднего радиального зазора), а в гибридном режиме — при различных значениях числа сжимаемости (частоты вращения вала).

Влияние удлинения пористых вставок газовых подшипников на характеристики шпиндельного узла

Пористые вставки во вкладышах газостатических опор выполнены в форме шпонки длиной t, шириной a и толщиной δ. Расчеты провели при относительной длине пористых шпоночных вставок t/a = 1, 2 и 3; относительном давлении наддува $\bar{p}_s$ = = 1/6; относительном эксцентриситете в передней опоре ε_1 = 0,6; относительной длине передней опоры $\bar{L}_1$ = 1,2; относительной длине задней опоры $\bar{L}_2$ = 1; относительной раздвижке линий наддува $\bar{b}$ = 0,6; относительной раздвижке подшипников $\bar{a}$ = 4; относительном вылете шпинделя $\bar{l}$ = 1; с числом пористых вставок в передней и задней опорах $N_{вст}$ = 6.

Зависимость относительной нагрузки на консоли вала $\bar{F}$ от конструктивного параметра K_C и относительной длины вставок представлена на рис. 1. В диапазоне значений конструктивного параметра K_C = 0,5...0,6 увеличение относительной длины пористых вставок t/a от 1 до 3 приводит к повышению относительной нагрузки $\bar{F}$ примерно на 24 %, что обусловлено ростом коэффициента несущей способности передней опоры (рис. 2). Увеличение площади пористой вставки смещает максимумы коэффициента

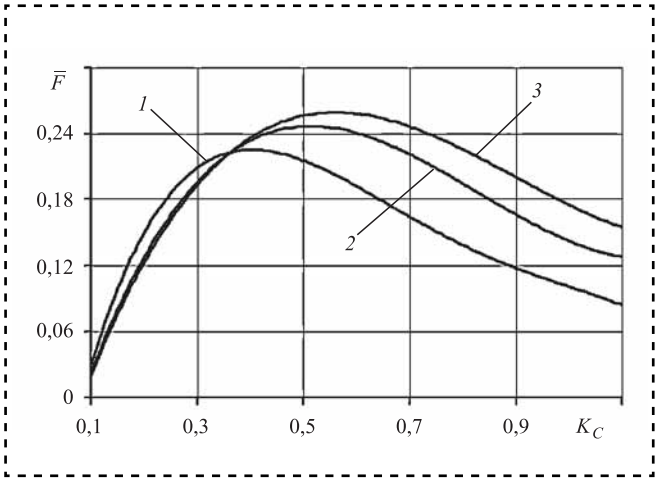


Рис. 1. Зависимость относительной нагрузки $\bar{F}$ от конструктивного параметра K_C:
1 — t/a = 1; *2* — t/a = 2; *3* — t/a = 3

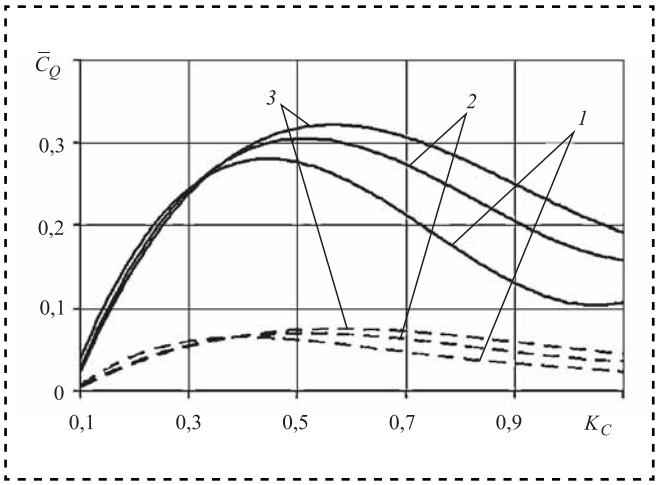


Рис. 2. Зависимость коэффициентов несущей способности опор C_Q от конструктивного параметра K_C:
1 — t/a = 1; *2* — t/a = 2; *3* — t/a = 3; — передняя опора; – – задняя опора

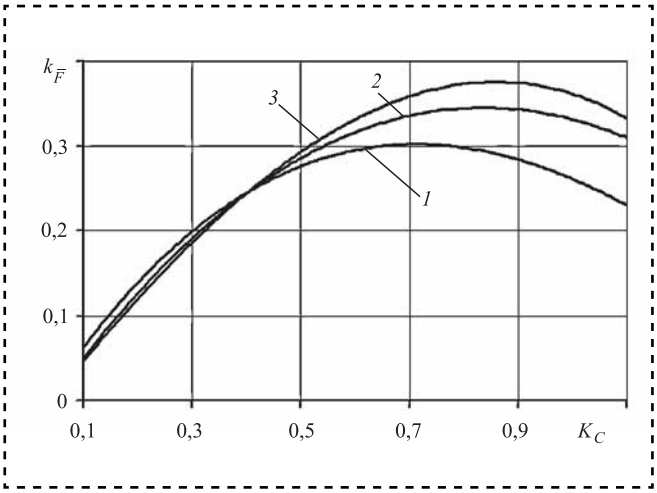


Рис. 3. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от конструктивного параметра K_C:
1 — t/a = 1; *2* — t/a = 2; *3* — t/a = 3

несущей способности C_Q в область повышенных значений конструктивного параметра.

Несущая способность заднего подшипника практически не меняется с увеличением длины шпоночных вставок, и существенно ниже, чем в передней опоре.

Зависимость коэффициента жесткости от параметра K_C и относительной длины вставок t/a представлена на рис. 3. Увеличение площади наддува газа ведет к росту жесткости на шлифовальном круге $k_{\bar{F}}$, что связано с общей тенденцией изменения жесткости опор ШУ при повышении площади пористой поверхности. Максимума коэффициент жесткости достигает при относительной длине пористой вставки t/a = 3 и конструктивном параметре K_C = 0,85.

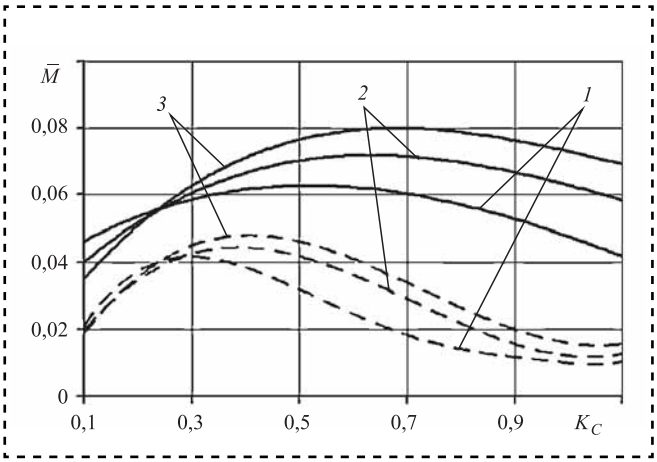


Рис. 4. Зависимость удельных моментов опор $\bar{M}$ от конструктивного параметра K_C:
1 — t/a = 1; *2* — t/a = 2; *3* — t/a = 3; — передняя опора; – – задняя опора

Относительная длина пористой вставки оказывает заметное влияние на удельный момент от перекоса передней и задней опор шпинделя (рис. 4). В области низких значений конструктивного параметра, когда разница в давлении нагрузочной и разгрузочной частей подшипников невысока, удельные моменты опор выше при малом значении t/a. С ростом конструктивного параметра преимущество использования более длинных вставок становится ощутимым.

Графики зависимостей $\bar{F} = f(\Lambda, t/a)$ и $C_Q = f(\Lambda, t/a)$ при работе ШУ в гибридном режиме представлены на рис. 5 и 6.

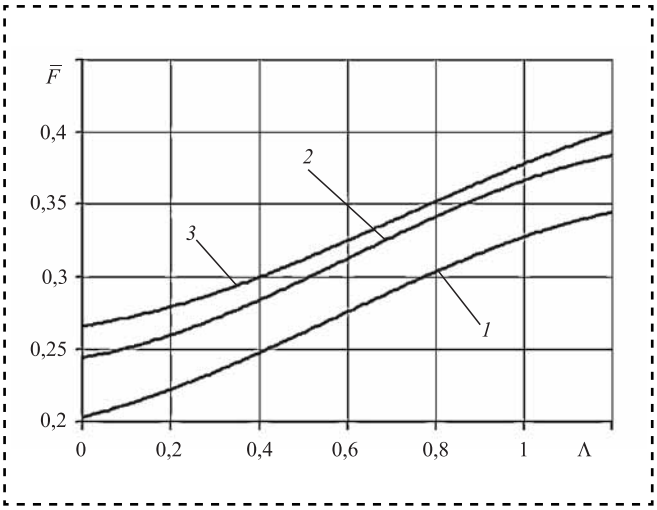


Рис. 5. Зависимость относительной нагрузки $\bar{F}$ от числа сжимаемости Λ:
1 — t/a = 1; *2* — t/a = 2; *3* — t/a = 3

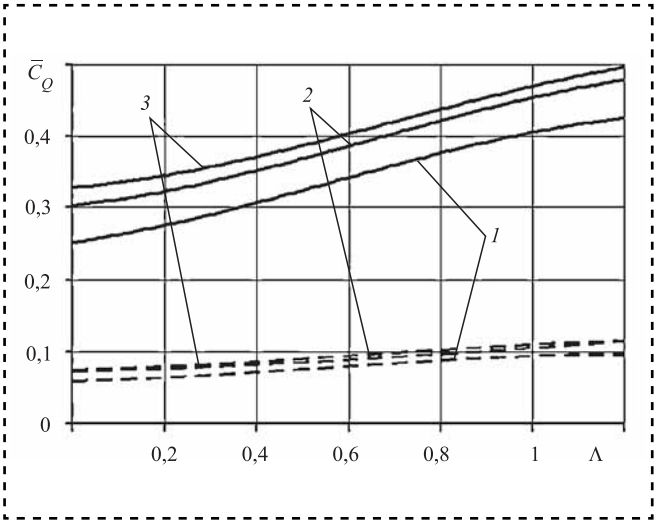


Рис. 6. Зависимость коэффициентов несущей способности опор C_Q от числа сжимаемости Λ:
1 — t/a = 1; *2* — t/a = 2; *3* — t/a = 3; — передняя опора; – – задняя опора

Графики зависимости $\bar{F} = f(\Lambda, t/a)$ наглядно демонстрируют, что увеличение относительного удлинения пористых вставок способствует росту относительной нагрузки на консоли шпинделя. Как видно из зависимости $C_Q = f(\Lambda, t/a)$, это связано в основном с увеличением коэффициента несущей способности переднего подшипника. Но в том и другом случае разница в улучшении характеристик при удлинении вставки от $t/a = 2$ до $t/a = 3$ незначительна и составляет в области умеренных значений Λ всего около 5 %.

Рост удлинения вставок в заднем подшипнике не оказывает существенного влияния на несущую способность опоры.

Анализ зависимости $k_{\bar{F}} = f(\Lambda, t/a)$ показывает, что кривые коэффициента жесткости при разных значениях удлинений пористых вставок практически совпадают во всем диапазоне изменения числа сжимаемости Λ (рис. 7).

Изменение удельного момента от перекоса вала в опорах сравнительно слабое, что видно из графиков зависимости $\bar{M} = f(\Lambda, t/a)$ (рис. 8).

Зависимость угла ориентации нагрузки ψ от числа сжимаемости Λ и удлинения пористых вставок t/a показана на рис. 9.

До значения критерия сжимаемости $\Lambda = 0{,}6$ угол ориентации нагрузки переднего подшипника слабо зависит от удлинения пористых вставок. В области $\Lambda > 0{,}6$ в опорах с меньшим значением t/a угол ψ снижается вследствие большего влияния на формирование поля давления в зазоре эффекта смазочного клина. Точность вращения шпинделя возрастает.

Самый большой угол ψ задней опоры при $t/a = 1$ по сравнению с удлинением вставок, равным 2 и 3.

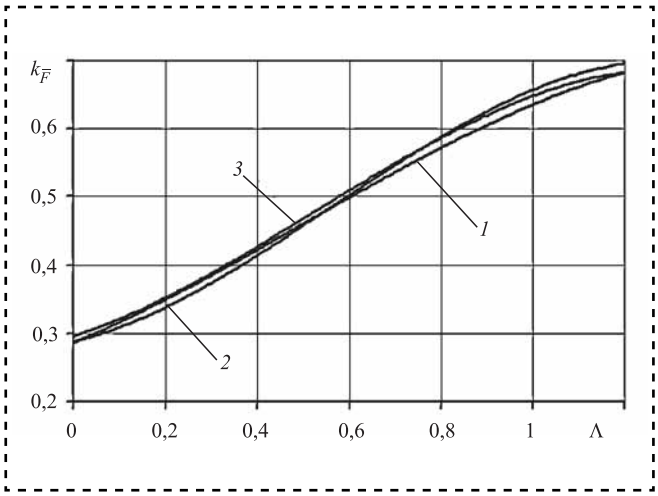


Рис. 7. Зависимость коэффициента жесткости $k_{\bar{F}}$ от числа сжимаемости Λ:
1 — $t/a = 1$; *2* — $t/a = 2$; *3* — $t/a = 3$

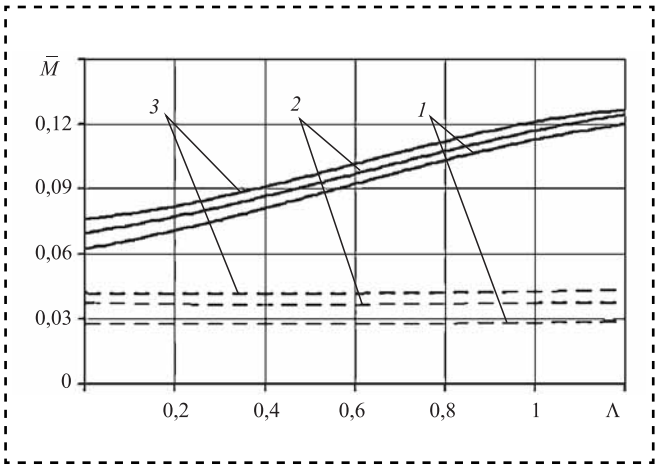


Рис. 8. Зависимость удельных моментов опор $\bar{M}$ от числа сжимаемости Λ:
1 — $t/a = 1$; *2* — $t/a = 2$; *3* — $t/a = 3$; — передняя опора; – – задняя опора

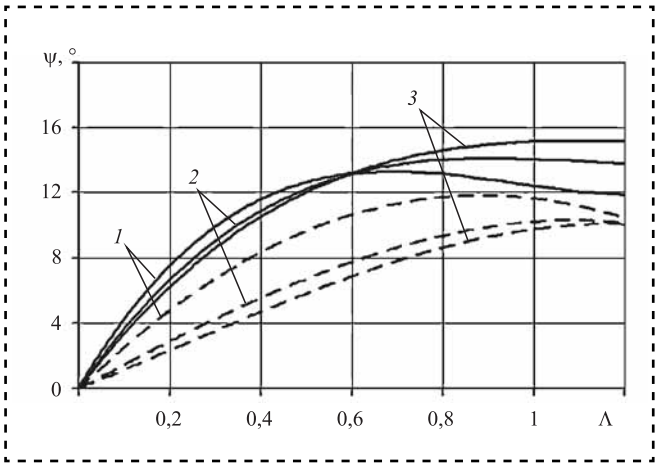


Рис. 9. Зависимость угла ориентации нагрузки φ от числа сжимаемости Λ:
1 — $t/a = 1$; *2* — $t/a = 2$; *3* — $t/a = 3$; — передняя опора; – – задняя опора

Это связано с заметно малым значением относительного эксцентриситета ε_2.

Выводы

Расчетное исследование влияния удлинения пористых вставок газостатических опор на выходные характеристики ШУ в условиях подвеса показало, что повышение нагрузочной способности и жесткости на консоли шпинделя обеспечивается, прежде всего, ростом несущей способности передней газовой опоры.

Удлинение пористых вставок приводит к смещению максимума несущей способности передней опоры в область больших значений кон-

структивного параметра K_C. Появляется техническая возможность изготовить вкладыш опоры с увеличенным радиальным зазором, а это технологически проще.

При работе шпинделя в гибридном режиме существенное улучшение выходных характеристик, связанных с увеличением относительной длины пористых вставок газовой опоры, происходит при числах сжимаемости более 0,6...0,8, т.е. при заметном влиянии эффекта смазочного клина в опоре.

Библиографический список

1. **Шаломов В.И.** Особенности методики расчета выходных характеристик шпиндельного узла на частично пористых газостатических опорах // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2016. № 2. С. 35—37.

2. **Шаломов В.И.** О влиянии некоторых параметров газовых опор на выходные характеристики шпиндельных узлов шлифовальных станков // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2012. № 3. С. 32—36.

3. **Космынин А.В., Виноградов В.С.** Газовые подшипники высокоскоростных турбоприводов металлообрабатывающего оборудования. Владивосток: Дальнаука, 2002. 327 с.

4. **Выходные** характеристики высокоскоростных шпиндельных узлов на газовых опорах / А.В. Космынин и др. М.: Издательский Дом "Академия Естествознания", 2011. 178 с.

УДК 621.757

Ю.З. Житников, Б.Ю. Житников, *д-ра техн. наук,* **А.А. Клычев**
(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева)
E-mail: zhitnikovy@mail.ru

Необходимые и достаточные условия надежного закрепления заготовки в трехкулачковом патроне при токарной обработке на станках с ЧПУ

Обоснованы достаточные условия надежного закрепления заготовки в трехкулачковом патроне, при которых на поверхности заготовки возникают только упругие деформации.

Sufficient conditions of reliable fixing preparation in the three-cam draw-in attachment under which on a surface of preparation there will be only elastic deformations are proved.

Ключевые слова: достаточные условия, упругая деформация, закрепление, заготовка.

Keywords: sufficient conditions, elastic deformation, fixing, preparation.

Введение

Станки с ЧПУ с использованием современных режущих инструментов обеспечивают обработку заготовок при повышенных режимах со значительными силами и моментами резания. Увеличение сил и моментов закрепления заготовок не исключает появления на их взаимодействующих поверхностях с кулачками патрона остаточных пластических деформаций. Поэтому при расчетах условий надежного закрепления заготовок требуется определить не только необходимые, но и достаточные условия.

Под необходимыми условиями надежного закрепления заготовки понимают невозможность ее проворота вокруг собственной оси под действием сил или моментов резания, под достаточными условиями — недопустимость появления на поверхности заготовки, взаимодействующей с кулачками патрона, остаточных пластических деформаций.

Невыполнение условий надежного закрепления заготовки приводит к браку в производстве, поломке режущего инструмента.

Необходимые условия закрепления заготовки

Необходимое условие надежного закрепления заготовки в трехкулачковом патроне, исключающее ее проворот вокруг оси, обеспечивается, когда момент трения заготовки под действием силы нормального давления кулачков патрона будет больше момента резания:

$$M_{тр} > M_р, \quad (1)$$

где $M_{тр}$ — момент трения заготовки о кулачки;

$M_р$ — момент резания при обработке заготовки.

Момент трения запишем:

$$M_{тр} = 3NfR_1, \quad (2)$$

где N — сила нормального давления кулачков патрона на поверхность заготовки;

f — коэффициент трения скольжения;

R_1 — радиус цилиндрической поверхности заготовки.

Силу резания в зависимости от параметров обработки заготовки, ее материала и материала режущего инструмента находят расчетным путем, а момент резания:

$$M_р = F_р R_1. \quad (3)$$

Тогда с учетом уравнений (2) и (3) выражение (1) примет вид:

$$3NfR_1 = F_р R_1 k, \quad (4)$$

где k — коэффициент запаса момента (силы) трения.

Сила нормального давления (сила надежного закрепления заготовки) в трехкулачковом патроне:

$$N = \frac{kF_р}{3f}. \quad (5)$$

Достаточные условия закрепления заготовки при возникновении на ее поверхности только упругих деформаций

Достаточное условие надежного закрепления заготовки при возникновении на ее поверхности только упругих деформаций обеспечивается, когда сила нормального давления кулачков будет меньше допустимой силы смятия поверхности заготовки $F_{см}$:

$$N < F_{см}. \quad (6)$$

При упругой деформации поверхности допустимую силу смятия находят из выражения:

$$\delta_{см} = \frac{F_{см}}{S_{см}} \leqslant [\delta_{см}], \quad (7)$$

где $\delta_{см}$, $[\delta_{см}]$ — действительное и допустимое напряжения смятия материала заготовки;

$S_{см}$ — площадь взаимодействия кулачков патрона и заготовки.

Учитывая, что взаимодействие цилиндрической поверхности детали с цилиндрическими поверхностями кулачков, радиус R_2 которых несколько больше радиуса заготовки R_1, площадь смятия находят из выражения:

$$S_{см} = 2al \cdot 3 = 6al, \quad (8)$$

где a — полуось пятна контакта взаимодействующих поверхностей;

l — длина взаимодействия.

Полуось пятна контакта взаимодействия цилиндрических поверхностей [1—3]:

$$a = 1,522\sqrt{\frac{qR_1R_2}{E_{пр}(R_2 - R_1)}}, \quad (9)$$

где q — удельная нагрузка на единицу длины взаимодействия поверхности заготовки и кулачков патрона;

$E_{пр}$ — приведенный модуль упругости материалов заготовки и кулачков.

Удельную нагрузку на единицу длины [2, 3] выразим из формулы:

$$P = \frac{3}{4}ql, \quad (10)$$

где P — сила взаимодействия кулачков и заготовки, $P = F_{см}$.

Тогда удельная нагрузка:

$$q = \frac{4F_{см}}{3l}. \quad (11)$$

Приведенный модуль упругости материалов кулачков и заготовки:

$$E_{пр} = \frac{2E_1E_2}{E_1 + E_2}, \quad (12)$$

где E_1 — модуль упругости материала заготовки;

E_2 — модуль упругости материала кулачка.

Подставим в формулу (9) выражения (11), (12) с учетом (7) и (8) и после преобразований окончательно получим:

$$a = 1,522\sqrt{\frac{4\left[\delta_{см}\right]aR_1R_2\left(E_1+E_2\right)}{E_1E_2\left(R_2-R_1\right)}}$$

или

$$a = \frac{1,522^2 \cdot 4\left[\delta_{см}\right]aR_1R_2\left(E_1+E_2\right)}{E_1E_2\left(R_2-R_1\right)}. \qquad (13)$$

Найдем из выражения (7) силу смятия:

$$F_{см} = \left[\delta_{см}\right]S_{см}. \qquad (14)$$

Подставим в формулу (6) выражения (5), (14) и с учетом (8) и (13) после преобразований получим:

$$\frac{kF_р}{3f} < \frac{55,6\left[\delta_{см}\right]^2 lR_1R_2\left(E_1+E_2\right)}{E_1E_2\left(R_2-R_1\right)}. \qquad (15)$$

При выполнении условия (15) на поверхности заготовки возникают только упругие деформации. При невыполнении — необходимо увеличить площадь взаимодействия кулачков патрона с поверхностью заготовки за счет длины l кулачков патрона.

Найдем из выражения (15) минимальную длину взаимодействия кулачков патрона с поверхностью заготовки:

$$L_{min} > \frac{kF_р E_1E_2\left(R_2-R_1\right)}{166,8f\left[\delta_{см}\right]^2 R_1R_2\left(R_1+E_2\right)}.$$

Экспериментальная проверка показала, что минимальную длину взаимодействия следует увеличить в 1,2 раза.

Заключение

Получено математическое выражение (15), выполнение которого гарантирует отсутствие остаточных деформаций на поверхности заготовки. При невыполнении условия (15) найдена минимальная длина взаимодействия кулачков патрона с заготовкой, при которой на поверхности заготовки не будут возникать остаточные деформации.

Библиографический список

1. **Демидов С.П.** Теория упругости: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 472 с.
2. **Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И.** Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
3. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов / под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2009. 656 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

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

УДК 621.791.048

И.О. Бохоров, В.В. Карабанов, *канд. техн. наук*
Тел.: 8-915-143-59-34, 8 (498) 520-34-72

Особенности индукционной пайки

Показано влияние электромагнитного поля индуктора на состояние жидкого припоя в паяльном зазоре. Установлены причины отслоения припоя, образования несплошностей и горячих трещин в паяном шве в процессе перемешивания жидкого припоя в широком зазоре.

The influence of the electromagnetic field of the inductor on the state of the molten solder in the soldering gap is shown. Displaying the flow of the mixing process of the liquid solder in the wide gap and the reasons for delamination of the solder and the formation of discontinuities and hot cracks in the soldered seam are established.

Ключевые слова: индукционный нагрев, индуктор, индуцируемый ток, глубина проникновения тока, острая кромка, электромагнитные силы.

Keywords: induction heating, induction coil, induced current, the current penetration depth, sharp edge, the electromagnetic force.

Индукционную пайку применяют в различных отраслях промышленности для улучшения условий труда, экономичности, получения высокого и стабильного качества паяных соединений. Высокая энергоемкость и мобильность индукционных установок позволяют организовать процесс пайки в любых производственных условиях, заменить традиционно применяемую ручную электродуговую сварку в области промышленного строительства и повысить технические показатели. Трубопроводы из коррозионностойкой стали, паянные с применением индукционного нагрева, имеют предел выносливости на 30 % выше, чем выполненные газопламенной пайкой. Индукционный нагрев широко применяют в инструментальном производстве, где до 80 % металлорежущего и горно-бурового инструмента с твердосплавными режущими элементами выполняют индукционной пайкой.

Индукционная пайка — результативный метод создания неразъемных соединений, способный решать поставленные перед промышленностью задачи по снижению трудоемкости производственных процессов, повышению производительности и качеству продукции.

Реализация основных особенностей высокочастотного нагрева металлов при индукционной пайке обеспечивает высокую скорость и локальность нагрева, управляемость процессом нагрева, принципиальную возможность создания как автономного автоматизированного оборудования, так и оборудования, работающего в едином технологическом комплексе.

Особенность индукционного нагрева металлов — генерирование тепловой энергии непосредственно в изделии, что определяет кинетику его разогрева и распределение температуры по сечению изделия.

Индуцируемый в металле ток наводится в поверхностном слое нагреваемого изделия. Глубина этого слоя зависит от частоты тока и природы нагреваемого металла (сталь, медь, алюминий и т.д.). Для магнитных материалов глубина проникновения наводимого тока меняется в процессе нагрева при переходе через точку магнитных превращений.

Индукционную пайку выполняют на специализированных установках, предназначенных для пайки конкретного типа изделий. Основные элементы установки для индукционной пайки: источник питания (преобразователь), в котором ток промышленной частоты преобразуется в ток высокой частоты, понижающий трансформатор и индуктор. Также в состав установки могут входить устройства для ручной, механизированной или автоматизированной фиксации и транспортирования паяемого изделия.

Индукционные установки мощностью 3...5 кВт применяют для единичной высокотемпературной

пайки небольших изделий; установки мощностью 10 кВт — при пайке режущего и бурового инструмента. На установках мощностью 25...100 кВт осуществляют пайку изделий больших размеров.

Наиболее широко в настоящее время применяют установки с тиристорным или транзисторным преобразователем мощностью 50...500 кВт и частотой тока до 66 кГц. Тиристорные преобразователи мобильны и компактны. Тиристорное управление выпрямленным напряжением обеспечивает высокую стабильность процесса нагрева. Машинные преобразователи мощностью 50...1500 кВт используют в стационарных условиях.

Основные параметры установки (преобразователя) для индукционной пайки — мощность и частота тока, при определении которых исходят из формы и размеров нагреваемого изделия, типа металла, температуры и времени пайки и т.п. Мощность источника должна превосходить полезную мощность, расходуемую на нагрев изделия, тепловые потери, электрические потери в цепи трансформатора и индуктора. С учетом мощности, необходимой для нагрева изделия, в зависимости от температуры пайки и свойств паяемых металлов выбирают источник питания [1].

При уменьшении частоты тока источника увеличивается глубина слоя, в котором происходит концентрация тока и снижается время, необходимое для равномерного нагрева изделия. Уменьшение частоты тока ниже определенного значения приводит к резкому падению эффективности передачи энергии от индуктора в изделие.

Наиболее эффективно применение индукционного нагрева при высокотемпературной пайке (выше 1200 °С), например для пайки деталей из тугоплавких металлов. При максимальной мощности и правильной настройке источника под пайку изделий из ферромагнитных материалов процессы нагрева протекают удовлетворительно, если на 1 см^2 нагреваемой поверхности приходится 1 кВт мощности.

Индуктор — элемент индукционной установки, передающий электрическую энергию в нагреваемый металл; представляет собой индуцирующий провод, изготавливаемый в основном из медной трубки круглого или профильного сечения с крепежными планками для подсоединения к трансформатору (рис. 1), с постоянным водяным охлаждением подаваемым внутри трубок.

Наиболее простой формой индуцирующего провода является кольцо. При необходимости нагрева более широкой зоны изделия индуктор изготавливают из нескольких колец или спирали. При других формах изделия токопровод индуктора должен максимально охватывать паяемую зону изделия.

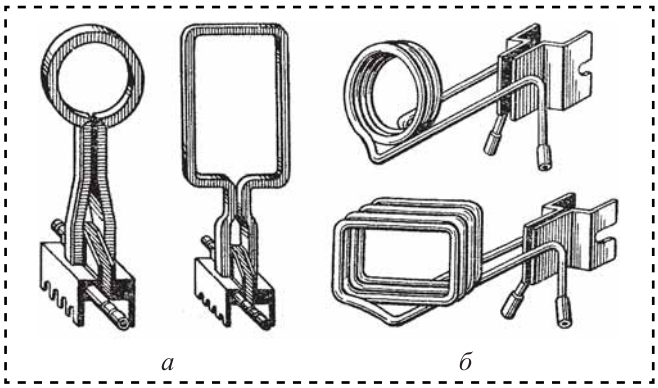


Рис. 1. Одновитковые (*а*) и многовитковые (*б*) индукторы

Зазор между витком индуктора и поверхностью изделия, как правило, колеблется в пределах от 2 до 30 мм. Индуктор по возможности располагают как можно ближе к поверхности изделия, учитывая условия установки индуктора на паяемое изделие и возможности поддержания равномерного зазора в процессе пайки.

При сложных условиях установки виток индуктора выполняют разъемным, который затем соединяют в единое целое, прижимая через проставные медные пластинки винтом или рычагом.

Индуцированный и протекающий в поверхностном слое изделия ток вызывает нагрев металла, при этом температура поверхностного слоя и более глубоких слоев зависит от подводимой к индуктору мощности, частоты тока, времени нагрева. Ширина нагреваемого участка, его форма и равномерность нагрева поверхностного слоя металла зависят от формы и положения индуктора относительно изделия, определяются характером распределения индуцированного тока в изделии и утечкой тепла в осевом направлении. Индуцированный ток концентрируется на участке изделия, ширина которого близка к ширине индуктора (обычно на 10...20 % меньше ширины индуктора).

Ширина индуцирующего провода более 10-кратного зазора с поверхностью изделия обеспечивает достаточно равномерный нагрев при неизменном зазоре.

Конструкция индукторов зависит от размера и формы нагреваемых изделий, способа их загрузки и выгрузки, электрофизических свойств металла паяемых деталей, мощности и частоты источника питания. Обычно применяют охватывающие конструкции индукторов, когда индуцирующий провод располагается снаружи паяемого узла и повторяет форму изделия в зоне пайки. Охватывающие индукторы обладают более высоким КПД и испытывают значительно

меньшее результирующее влияние электродинамических сил, направленных на изменение положения индуктора относительно детали.

Фактически большинство индукторов для пайки конструируют на основании практического опыта с последующей доводкой после их проверки в работе. Ориентировочный расчет выполняют аналогично расчету закалочных индукторов [2], исходя из требуемой мощности для нагрева изделия в заданное время.

При проектировании индукторов под пайку учитывают необходимость равномерного нагрева одновременно всех соединяемых элементов. При неравномерном нагреве на отдельных поверхностях может образоваться чрезмерная окалина, произойти не полное заполнение зазоров припоем, возможно оплавление острых кромок.

Индуктор соединяют или совмещают со спрейером для принудительного охлаждения паяных соединений с целью ускорения процесса пайки или термообработки изделия.

При индукционном нагреве не рекомендуется паять узлы, детали которых имеют в зоне нагрева резкие утонения или острые кромки [3]. Быстрый локальный нагрев и связанное с этим быстрое охлаждение приводят к возникновению в паяном шве растягивающих напряжений, уменьшающих прочность сборочных единиц.

При пайке стальных деталей необходимо стремиться к минимальному времени нахождения паяного участка выше температуры магнитных превращений из-за сильного окисления, обезуглероживания поверхностных слоев и роста зерна. Поэтому при индукционной пайке особенно важно определить такой режим нагрева, который бы оптимально сочетал максимально возможную скорость нагрева с минимально возможным перепадом температур по сечению паяемого изделия.

На практике применяют три способа выравнивания температуры по сечению паяемого соединения:

— режим скоростного нагрева, при котором температура поверхности нагреваемого участка быстро поднимается до температуры, близкой к температуре пайки, после чего в течение определенного времени температура выравнивается до допустимого значения;

— режим равномерного нагрева, при котором в течение всего периода перепад температур по сечению изделия не превышает 30...50 °С;

— режим ступенчатого нагрева, при котором металл сначала равномерно нагревается до температуры, при которой не происходит интенсивного окисления и обезуглероживания (примерно 800 °С), а затем быстро нагревается до температуры пайки.

При индукционной пайке равнозначных по объему деталей используют сквозной (глубинный) способ нагрева, который обеспечивает получение минимального перепада температур между поверхностью изделия и глубинными слоями металла. Поскольку глубина проникновения тока в сталь невелика, особенно до температуры магнитных превращений, то решающее значение в получении минимального перепада температур на нагреваемом участке изделия приобретает теплопроводность паяемого материала, а как следствие, скорость нагрева должна быть относительно небольшой. Чтобы обеспечить нагрев зоны за счет теплопроводности без перегрева других элементов узла уменьшают подводимую мощность и увеличивают время нагрева.

В случае значительной разницы в размерах деталей при любом способе индукционного нагрева детали нагреваются с интенсивностью, обратно пропорциональной объемам металла нагреваемых участков. Равномерности нагрева таких узлов при индукционной пайке добиваются распределением передаваемой на узел энергии между нагреваемыми деталями обратно пропорционально их объему. Такой способ нагрева используют, например, при индукционной пайке твердосплавного инструмента — резцов, путем установки петлевого индуктора над державкой, вне места расположения твердосплавной пластины, которая нагревается за счет теплопередачи от нагреваемой державки и частично ослабленным боковым полем индуктора (рис. 2). Другая схема размещения индуктора на резце представлена на рис. 3.

Напайку пластинок у многолезвийных инструментов проводят последовательно с помощью петлевых индукторов или одновременно с помощью индуктора сложной формы (рис. 4).

При массовом производстве инструментов применяют петлевые индукторы удлиненной формы (рис. 5). Подготовленные к пайке детали поступают в индуктор последовательно, и когда одни только начинают нагреваться, другие оказываются уже нагретыми до температуры пайки. Процесс ведется непрерывно.

С целью ускорения процесса индукционного нагрева инструмента в процессе пайки изменяют положение индуктора относительно резца (рис. 6).

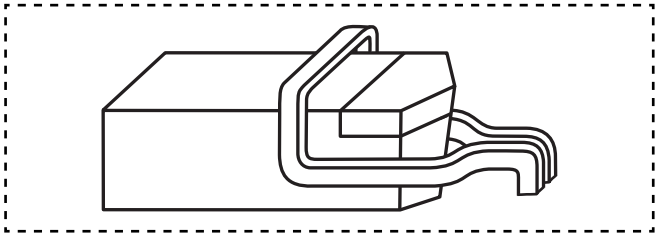


Рис. 2. Петлевой индуктор для напайки однолезвийных инструментов

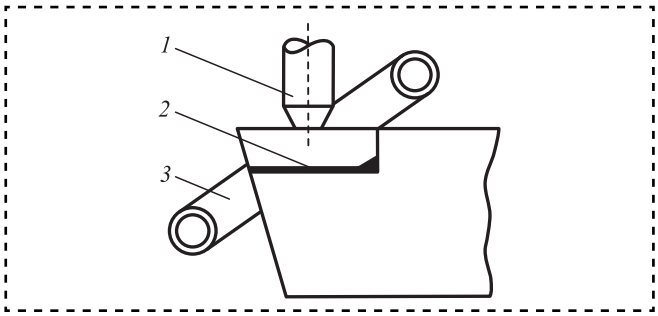


Рис. 3. Схема размещения индуктора при пайке резцов: *1* — прижим; *2* — паяный шов; *3* — индуктор

Характер индукционного нагрева паяемого узла из равновеликих деталей определяется не только конструкцией индуктора (индуцирующего провода), но и расположением его относительно соединяемых деталей или их участков. Индуцирующий провод должен охватывать массивную деталь и удален от тонкостенной на расстояние, при котором обеспечивается сопоставимая интенсивность нагрева соединяемых деталей. При этом тонкостенная деталь может нагреваться в основном за счет теплопередачи от массивной детали.

Используя возможность регулирования интенсивности нагрева тонкостенной детали изменением положения индуцируемого провода индуктора, во ВНИИСТ (г. Москва) разработаны технологии индукционной пайки косостыковых

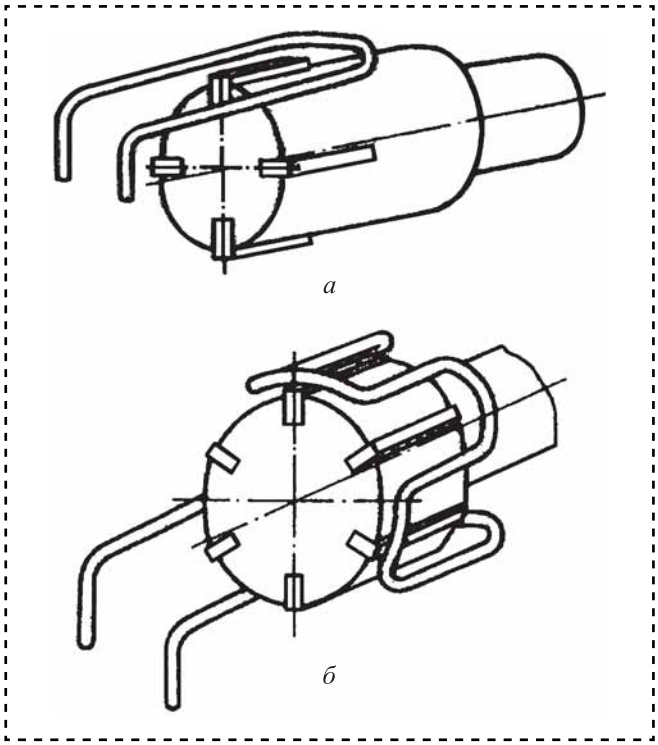


Рис. 4. Расположение петлевого индуктора при последовательной (*а*) и одновременной (*б*) напайке пластинок многолезвийного инструмента

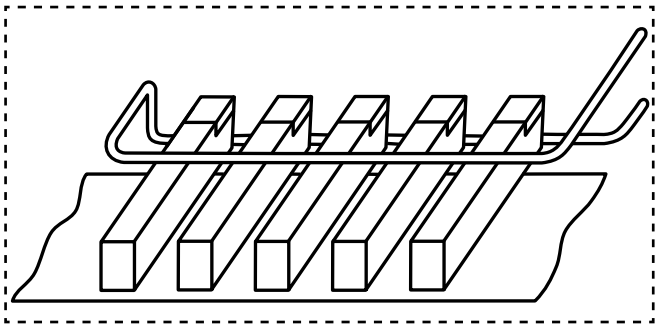


Рис. 5. Удлиненный петлевой индуктор для массовой напайки инструментов

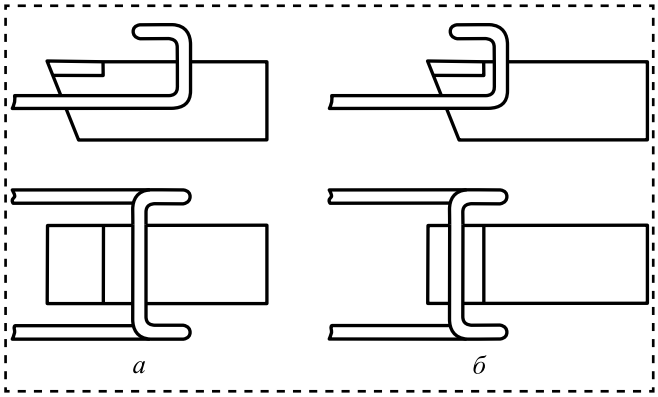


Рис. 6. Положение индуктора в процессе пайки резцов: *а* — в начале нагрева (до температуры 750 °С); *б* — в конце нагрева (при температуре свыше 750 °С)

соединений промысловых трубопроводов диаметром до 114 мм с толщиной стенки до 8 мм без пережога острой кромки. Угол скоса разделок труб — 30 и 20°. При пайке использовали порошковый припой на железной основе марки П87, из которого формовали конические кольца, зажимаемые между разделками при сборке труб (рис. 7). Температура пайки — 1200 °С.

Косостыковые паяные соединения равнопрочны с материалом трубы и позволяют сохранить сечение трубопровода. Но труба с косостыковыми разделками представляет неблагоприятную для индукционного нагрева конструкцию. Отсутствие контакта между соединяемыми разделками и наличие между ними прослойки порошкового припоя является препятствием для теплопередачи в нагреваемом изделии и обеспечения его равномерного нагрева. При использовании одновиткового индуктора, устанавливаемого над областью соединяемых разделок труб (рис. 8, *а*), в начальный период происходит опережающий нагрев острой наружной кромки, и при достижении в ней 750 °С перепад температур между кромками соединяемых разделок труб составляет около 400 °С, что приводит к их неравномерному тепловому расширению и к увеличению паяльного зазора в месте острой наружной кромки.

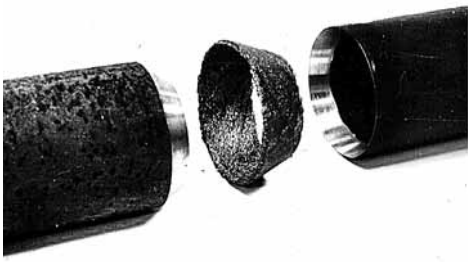


Рис. 7. Положение конических разделок труб и кольца припоя перед сборкой

Для снижения интенсивности нагрева острой кромки ослабляют воздействие на нее электромагнитного поля индуктора установкой индуктора в начальный период нагрева вне области разделок на примыкающем к ним участке ответной трубы (рис. 8, *б*). Это приводит к относительно низкой скорости нагрева острой кромки, сопоставимой со скоростью нагрева прилегающей к ней кромки ответной разделки. Установившийся режим равномерного нагрева кромок разделок сохранится, если при достижении в острой кромке температуры 750 °С виток индуктора переместить на область разделок, продолжая нагрев на тех же режимах.

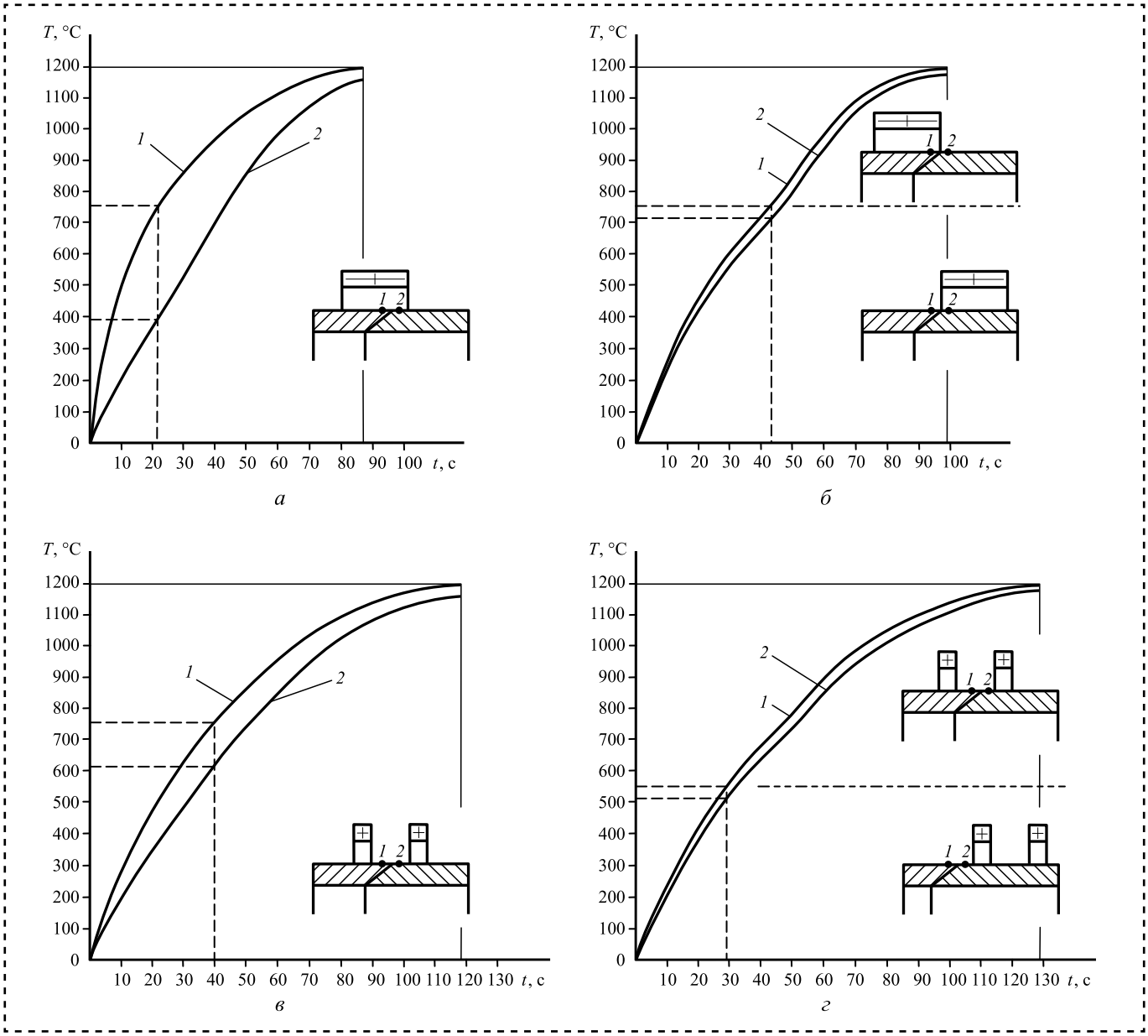


Рис. 8. Температурные режимы нагрева наружных кромок труб при пайке соединений с косостыковыми разделками при различных схемах расположения одновиткового и двойного индукторов

Интенсивность нагрева острой кромки разделки при индукционной пайке косостыковых соединений трубопроводов снижается при использовании двухвиткового индуктора (рис. 8, *в*) с двумя автономными витками, устанавливаемыми симметрично по отношению к острой кромке. В зависимости от размеров соединяемых труб расстояние между витками индуктора — 30...60 мм.

Неразъемный двойной индуктор применяли при индукционной пайке промысловых трубопроводов сечением 57×6 мм на Уренгойском НГКМ.

На поверхность собранных стыков в области кромок разделок наносили слой эмалевой фриты МК-5 или три слоя стекловолокнистой ленты марки ЛЭС, после расплавления которых при нагреве создается вязкое технологическое покрытие, защищающее место пайки от воздействия атмосферы и обеспечивающее качественное формирование паяного шва с образованием галтели (рис. 9). В процессе охлаждения соединения технологическое покрытие отслаивается и удаляется с поверхности, позволяя провести визуальный контроль. Технология индукционной пайки обеспечила получение равнопрочных с металлом трубы паяных соединений (рис. 10).

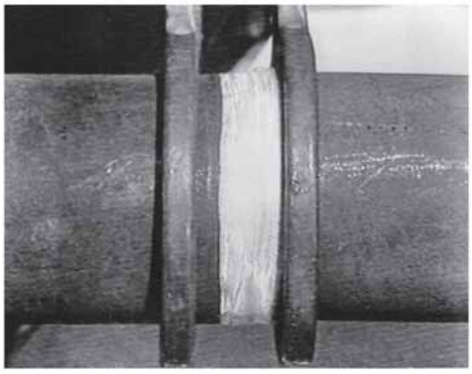
По результатам промышленных испытаний способ индукционной пайки трубопроводов включен в отраслевые нормативные документы (ВСН-006—89, СП 42-102—2004, СТО Газпром 2-2.2-496—2010).

Более благоприятный режим нагрева обеспечивают при установке двойного индуктора в начале нагрева вне области разделок, а при достижении на наружной острой кромке 550 °С смещают его без прекращения нагрева в область формирования паяного соединения (см. рис. 8, *г*).

Во ВНИИТВЧ (г. Санкт-Петербург) для индукционной пайки косостыковых соединений трубопроводов в трассовых условиях разработаны разъемные индукторы. Профиль индуктора обеспечивает равномерный нагрев места соединения труб (а.с. № 1167215) диаметром 57...89 мм с толщиной стенки 5...10 мм и диаметром 114...325 мм с толщиной стенки до 15 мм при использовании тиристорного преобразователя с частотой тока 2,4 кГц.

Электромагнитное поле индуктора влияет на процесс формирования паяного шва. Действующие при индукционной пайке электромагнитные силы приводят к интенсификации движения расплавленного припоя, активизации действия флюса, улучшению смачиваемости паяемых поверхностей изделия припоем. Наличие электрического заряда на границе жидкого припоя с паяемым металлом снижает его поверхностное

а



б

в

Рис. 9. Соединения труб, паянных с применением защитных покрытий:
а — эмали марки МК-5; *б*, *в* — стекловолокнистой ленты марки ЛЭС

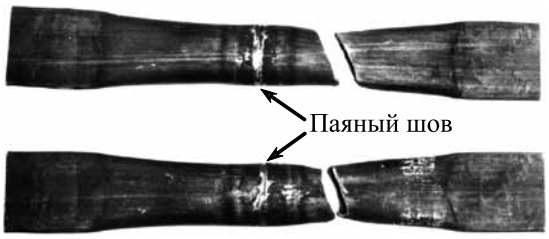


Рис. 10. Образцы паяных косостыковых соединений труб после испытания на растяжение

натяжение, увеличивает силы сцепления атомов жидкого припоя с паяемым металлом, вследствие чего увеличивается смачиваемость расплавов припоя и их жидкотекучесть, интенсифицируется электромассоперенос через межфазную границу. Электромагнитное поле, создаваемое при индукционной пайке в области паяльного зазора, влияет на увеличение скорости кристаллизации припоя, ускоряет зародышеобразование и уменьшает степень переохлаждения расплава, влияет на перераспределение примесей.

Твердый и жидкий металлы, внесенные в электромагнитное поле индуктора, не только нагреваются, но и испытывают давление со стороны поля. Механические силы, возникающие вследствие взаимодействия индуцированного тока с вызвавшим его полем, стремятся выбросить металл за пределы поля. Металл в таком поле испытывает давление пропорционально квадрату напряженности магнитного поля.

Результирующую электромагнитных сил, направленную противоположно силе гравитации, используют при индукционной плавке чистых металлов во взвешенном состоянии [4]. Положение тонкостенной детали в паяемом узле обеспечивают механическим креплением или прижимом, как при пайке твердосплавного инструмента (см. рис. 3). Силовое воздействие электромагнитного поля на жидкий припой приводит при пайке к вытеснению его из некапиллярного паяльного зазора.

При отработке технологии индукционной пайки V-образных соединений вертикально расположенных обсадных труб сечением 219×12 мм с паяльными зазорами 0,3...0,4 мм с применением припоя марки П87 и одновиткового цилиндрического индуктора наблюдали выплескивание жидкого припоя из паяльного зазора в форме крупных капель (рис. 11, *а*), падавших к основанию образца или растекавшихся по поверхности труб (рис. 11, *б*) с растворением окалины и металла труб. В паяльном зазоре происходило образование раковин (рис. 11, *в*) и непропаев (рис. 11, *г*). Поверхности дефектных участков, луженные припоем, имеют блестящий металлический цвет [5].

Предотвратить выплескивание расплавленного припоя из паяльного зазора удалось после применения цилиндрического индуктора с вогнутой внутренней стенкой, т.е. стенкой, удаленной от области разделок (рис. 12). При использовании такого индуктора формировались качественные соединения без выплескивания припоя из зазора. Максимальная протяженность паяной колонны составила 2000 м при средней длине труб 10 м, масса 110 т.

Вытеканию расплавленного припоя из паяльного зазора препятствуют силы поверхностного натяжения припоя. Поэтому при индукционной пайке соединений с узкими капиллярными зазорами вытекания припоя из зазора обычно не происходит. При этом частота тока должна быть тем выше, чем меньше капиллярная постоянная металла [6].

Действие давления электромагнитного поля индуктора на жидкий металл наблюдали при индукционной пайке соединений алюминированных труб, при которой слой расплавленного при нагреве покрытия сдвигается по поверхности нагретых труб с образованием кольцевых валиков (рис. 13).

При индукционной пайке на расплавленный припой в некапиллярных зазорах воздействуют те же электромагнитные силы, что и при индукционной плавке металлов в тигельной печи. Индукционная тигельная плавильная печь представляет собой цилиндрическую электрическую систему с многовитковым индуктором. Важная особенность индукционной плавки металлов в тигельных печах — электродинамическая циркуляция в тигле жидкого металла — электромагнитное перемешивание (ЭМП), которая ускоряет процесс плавления, обеспечивает гомогенность расплавленного металла. Расплавленный металл в тигле обжимается электромагнитным полем. Силы электродинамического взаимодействия индуцированного в нем тока и магнитного поля индуктора направлены радиально к оси тигля и убывают от максимального значения на поверхности до нуля на его оси. Создаваемое этими силами давление сжатия также возрастает от поверхности тигля до нуля на его оси. При неизменной мощности, передаваемой в расплав, силовое воздействие всегда усиливается с понижением частоты тока.

Под действием такой системы сил жидкий металл выжимается из передней части тигля и перетекает от периферии к его оси, что и приводит к перемешиванию жидкого металла.

Процесс ЭМП жидкого металла широко применяют при электродуговой сварке металлов для улучшения структуры и механических свойств металла сварного шва. ЭМП используют как метод управления процессом кристаллизации металла шва с целью предупреждения пористости и повышения коррозионных свойств сварных швов.

Существенное влияние на формирование первичной структуры литого металла оказывает его движение в расплавленном состоянии. Наиболее удобным способом возбуждения вынужденного движения расплава в сварочной ванне (перемешивания металла) является электромагнитный, позволяющий управлять состоянием расплава

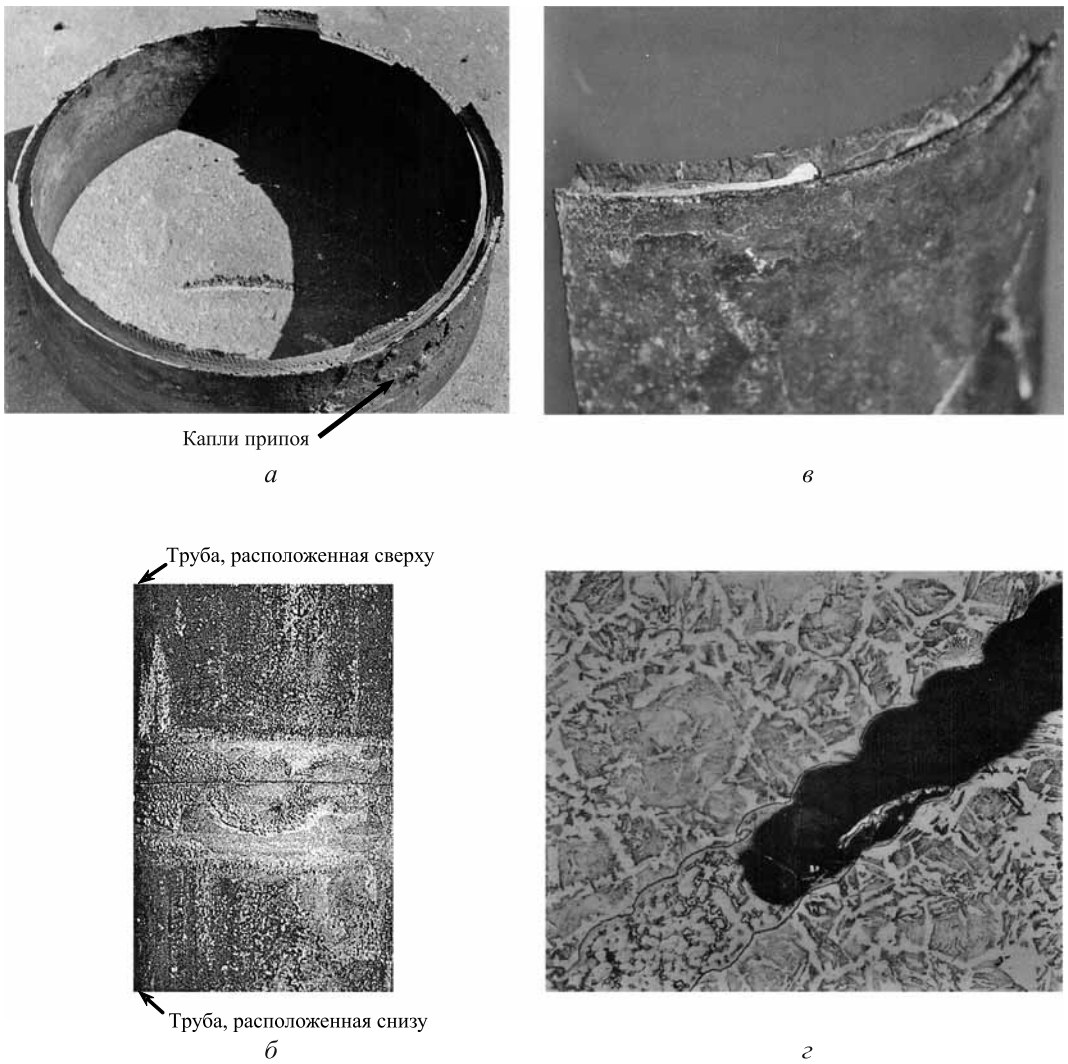


Рис. 11. Дефекты при индукционной пайке:
а — капли припоя на поверхности трубы, примыкающей к паяному шву; *б* — растекание расплава припоя по наружной поверхности паяного стыка вертикально расположенных труб; *в* — раковина в паяном шве; *г* — непропай в паяном шве, ×100

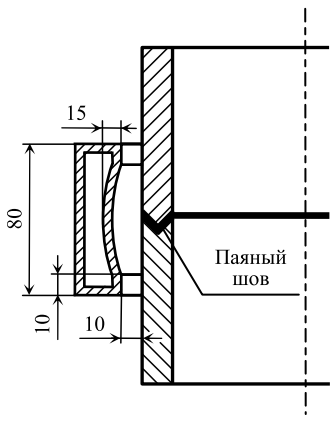


Рис. 12. Схема размещения индуктора с вогнутой внутренней стенкой на паяемом стыке обсадных труб

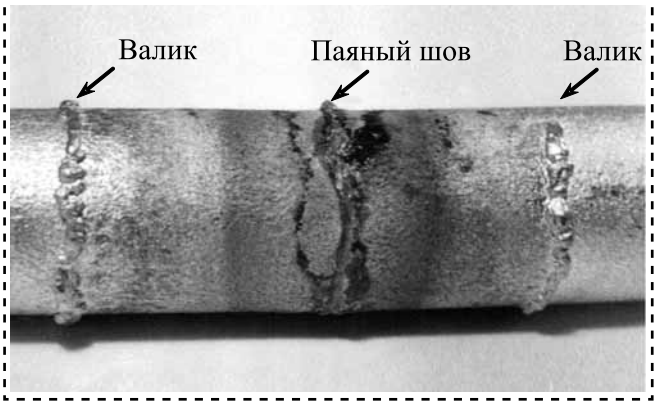


Рис. 13. Валики, образованные при вытеснении защитного покрытия в процессе индукционной пайки алюминированных труб

путем регулирования параметров внешних электромагнитных полей [7]. Исследования, проведенные в Киевском политехническом институте, подтвердили высокую эффективность применения ЭМП для управления процессом кристаллизации сварных швов и предупреждения образования в них дефектов. Были разработаны способы и техника для их осуществления.

При индукционной пайке крупных изделий в больших паяльных зазорах также образуются условия для протекания процесса ЭМП. При относительно небольшом объеме припоя в паяльном зазоре и близости паяемых поверхностей, при движении по ним расплава припоя происходит интенсивная эрозия паяемого металла и насыщение им жидкого припоя. В результате химический состав паяного шва значительно изменяется.

Процесс индукционной плавки припоя с перемешиванием жидкого металла наблюдали при индукционном нагреве цилиндрическим индуктором V-образной разделки вертикально расположенного отрезка трубы, заполненной порошковым припоем марки П87. Расплавленный припой между паяемыми поверхностями деталей в случае перемешивания металла интенсивно насыщается элементами паяемого металла.

С целью подтверждения возможности протекания процесса ЭМП припоя при индукционной пайке соединений с некапиллярными зазорами во ВНИИСТе проводили индукционную пайку торцевых соединений (частота тока 2,4 кГц) партии стальных планок сечением 20×50 мм с фиксированными зазорами в пределах до 3 мм заполненными порошкообразным припоем, в качестве которого применяли: марганец, образующий с железом неограниченные твердые растворы, припой П87 на железомарганцевой основе и медь, образующую ограниченные растворы с железом. Порошковый припой вносили в стык между планками в форме прессованных пластинок с нанесенным на них флюсом марки ПВ201. Зазор между поверхностью планок и индуктором — 5 мм. Нагревали со скоростью 15 °С/с. При пайке проводили выдержки при температурах, на 10 и 50...60 °С превышающих температуру плавления припоя.

Во всех случаях отмечали значительное и равномерное насыщение всего объема металла шва железом вне зависимости от зазора и времени выдержки (таблица). При пайке припоем П87 и марганцем достигнута высокая степень концентрационного переохлаждения — 80...100 °С. Особенно высокое насыщение металла шва железом произошло при пайке марганцем. При температуре нагрева 1260 °С, что на 10 °С превышает температуру плавления марганца, массовая доля железа в шве составила 56 %, а при 1350 °С — 71 % при равномерном распределении железа по ширине шва (рис. 14, *а*). Такое равномерное насыщение металла шва железом — признак активного движения и перемешивания расплава припоя в некапиллярном зазоре. Структура шва, паянного марганцем, отличается плотным расположением равноосных кристаллов (рис. 14, *б*).

При пайке медью избыточная фаза на основе железа равномерно распределена по объему шва в виде мелких включений.

Значительные изменения состава и структуры припоя в некапиллярном зазоре в результате его перемешивания в жидком состоянии снижают свойства паянного шва. При индукционной пайке косостыковых соединений трубопроводов с некапиллярными зазорами с применением одновиткового

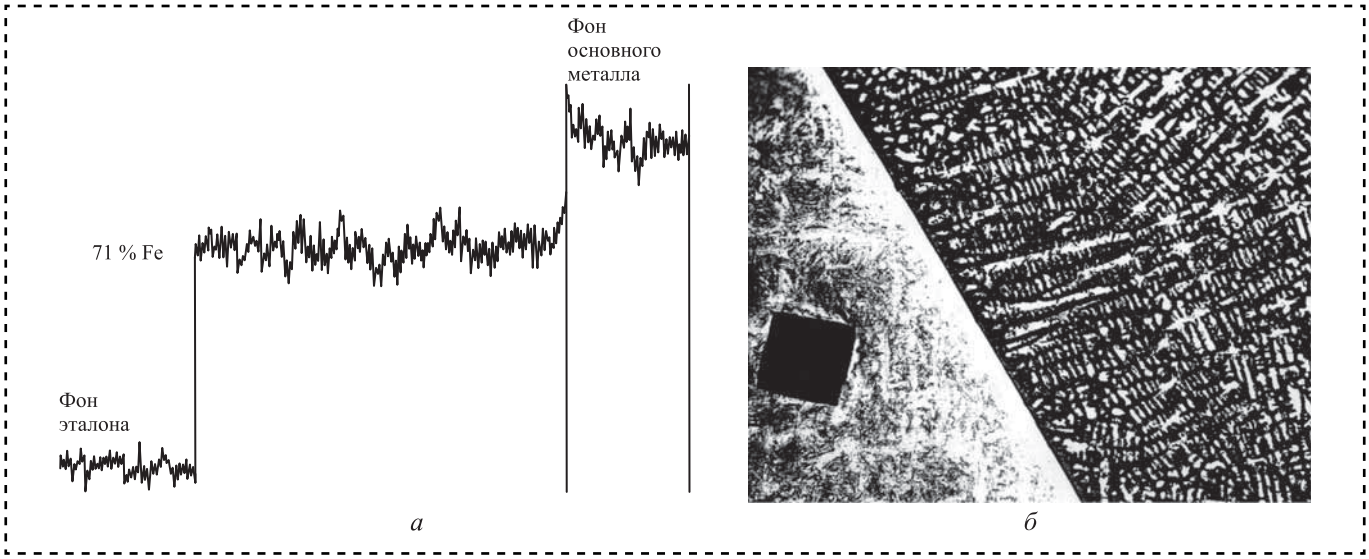


Рис. 14. Распределение железа по шву шириной 3 мм при пайке марганцем с применением индукционного нагрева при выдержке 30 с (*а*) и структура шва, ×120 (*б*)

Параметры торцевых швов, паянных с широкими зазорами

Припой	Температура пайки, °С	Мощность нагрева, кВт	Выдержка	Паяльный зазор, мм	Массовая доля Fe, %	Временное сопротивление разрыву, МПа	Температура концентрационного переохлаждения, °С
Марганец	1260	30	30	1	56	420	100
				2	54	460	
				3	50	410	85
			60	2	55	430	100
				3	53	420	96
	1350	38		2	71	550	100
П87	1145	18	30	1	41	390	—
			—	2	40		
			30		43		
			60		51	460	
			30	3	47	440	
	1200	23		2	60	560	80
			60		71	580	100
Медь	1090	15	30	1	3,3	450	—
				2	2,3	440	
				3		460	
			60	1	3,2	470	
				2	3,2	480	
				3	3,4	420	

индуктора, устанавливаемого над областью разделок, в паяных швах наблюдали отслоение припоя от поверхности разделок труб (при паяльных зазорах, превышающих 0,4...0,5 мм (рис. 15)). Поверхности, образованные в результате отслоения, имеют блестящий металлический цвет. Отслоившийся от поверхности разделок слой припоя легко удаляется. На поверхностях со стороны разделки и отслоившегося слоя припоя четко просматривается рельеф поверхности разделки, образованный при их механической обработке перед пайкой.

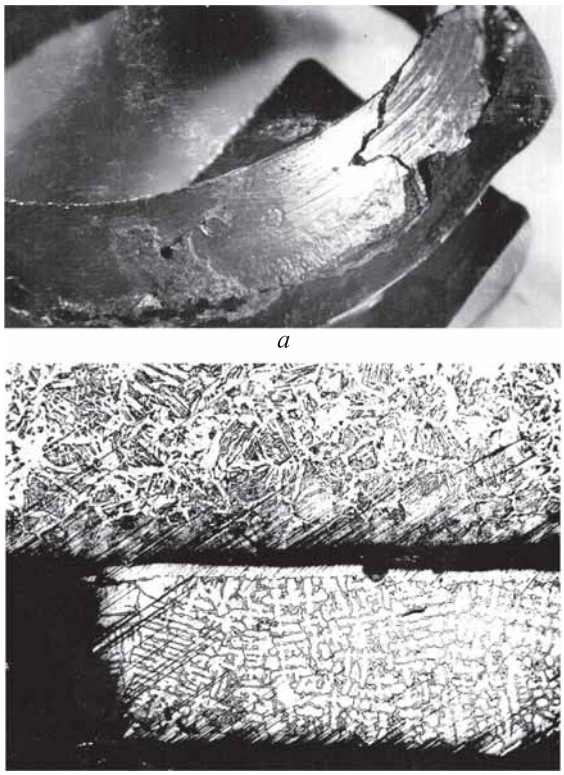
Одна из причин образования трещин в паяных швах — несоответствие периода кристаллических решеток соединяемых металлов. Оно может возникнуть как в результате применения припоя, период решетки которого не соответствует периоду решетки паяемого металла, так и вследствие взаимной диффузии паяемого металла и припоя при пайке [8].

Примененный при пайке припой на железомарганцевой основе марки П87 имеет однородную аустенитную структуру и одинаковую с паяемой сталью кристаллическую решетку. При растворно-диффузионном взаимодействии металлических систем припоя и стали интерметаллидных фаз не образуется. Наличие большого разнообразия припоев на основе марганца, предназначенных для пайки стальных конструкций [2], свидетельствует о хорошей совместимости такого припоя со сталью. Следовательно, возможными причинами отслоения припоя являются процессы, протекающие в паяльном зазоре непосредственно во время проведения пайки.

Отслоение припоя наблюдали не только в паяном шве, но и на внутренних поверхностях соединяемых труб, в случае вытекания на них расплава припоя из паяльного зазора и при глубине проникновения индуцируемого тока, превышающей толщину паяемых труб (рис. 16).

При металлографическом исследовании образованных при отслоении поверхностей выявлено, что они как со стороны паяемого металла, так и со стороны припоя имеют идентичную крупнозернистую структуру (рис. 17), характерную для перегретой стали. Ввиду высокой чистоты поверхностей металлографические исследования проводили без механической и химической обработки.

Исследования дефектных участков по поперечному срезу показали, что разрушение паяемого шва при наличии в нем отслоения припоя происходило по границе паяемый металл — пере-



а

б

Рис. 15. Отслоение припоя от поверхности разделок труб при индукционной пайке соединений с некапиллярными зазорами:
а — общий вид разрушенного паяного шва; *б* — структура в месте отслоения, ×100

ходный слой шва. Аналогичный характер разрушения отмечен и во внутренней полости стыка.

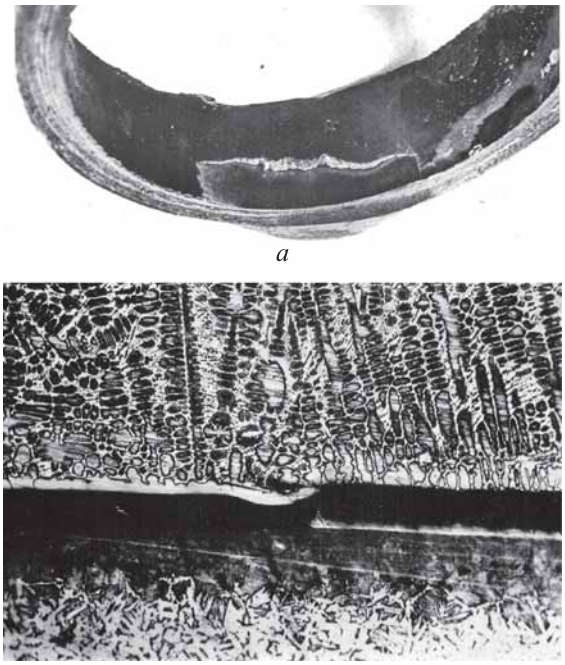
Во всех случаях имеет место образование микрозазора между поверхностями, что вызвано объемными изменениями припоя при охлаждении (см. рис. 15, *б* и рис. 16, *б*). Блестящий металлический цвет образованных поверхностей свидетельствует о том, что процесс отслоения проходил при низкой температуре. Высокая плотность отслоившегося слоя припоя, отсутствие в нем флюсовых включений и пор говорит об активном процессе перемешивания металла, проходившем при пайке.

При определении химического состава переходного слоя шва определено, что концентрация основного паяемого металла (85 % железа в переходном слое, образованном в электромагнитном поле индуктора), значительно превышает его содержание в переходном слое, образованном вне его (50 %). По содержанию основных элементов припоя (железа и марганца) состав переходного слоя на дефектных участках соответствует составу марганцовистой стали.

Микрорентгеноспектральный анализ образованных при отслоении поверхностей показал, что если на поверхности переходного слоя массовая доля марганца 9 %, то на поверхности со стороны паяемого металла обнаружены только его следы. Следовательно, разрушение паяного шва при отслоении припоя проходило по определенной атомной плоскости, являющейся границей взаимодействия двух металлических систем. Такое распределение марганца между поверхностями объясняется тем, что его коэффициент диффузии в твердой фазе практически равен нулю. Поверхность переходного слоя припоя на дефектном участке состоит в основном из γ-фазы с гранецентрированной кубической решеткой, характерной для припоя, в то время, как поверхность со стороны паяемого металла полностью состоит из α-фазы с объемно центрированной кубической решеткой, которую имеет паяемая сталь.

Изменение химического состава припоя в шве сопровождается изменением его механических свойств. Особенно резко эти изменения происходят в переходном слое. Анализ свойств железомарганцевых сплавов показывает, что при содержании в них марганца в количествах, соответствующих его содержанию в переходном слое дефектного участка, резко изменяются физические свойства сплава, как по сравнению со сплавами с иным содержанием марганца, так и с паяемой сталью (сталь 20).

С повышением массовой доли марганца в сплавах от 8 до 10 % коэффициент термиче-



а

б

Рис. 16. Отслоение припоя на внутренней поверхности трубы при индукционной пайке:
а — общий вид; *б* — структура в месте отслоения, ×100

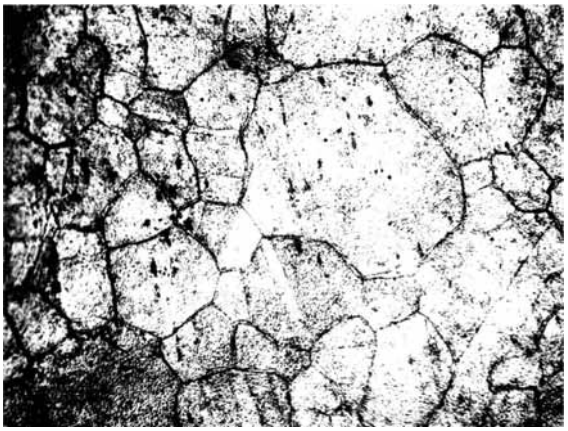


Рис. 17. Структура поверхности металла в месте отслоения припоя, ×100

ского расширения сплава скачкообразно увеличивается, что связано с переходом феррита сплава в аустенит. Аналогичным образом меняются прочность и твердость сплавов.

Отслоение припоя в шве произошло по границе соединения двух металлических систем с различными коэффициентами термического расширения, образовавшихся в паяльном зазоре в процессе индукционной пайки вследствие локализации внутренних напряжений сдвига по атомной плоскости, служащей границей систем.

Для предупреждения образования дефекта в виде отслоения припоя необходимо ослабить или устранить воздействие электромагнитного поля индуктора на припой, что достигается путем использования двухвиткового индуктора с автономными витками, устанавливаемыми симметрично относительно разделок кромок труб. При этом варианте установки индуктора нагрев разделок происходит в основном за счет теплопередачи от нагреваемых соседних участков труб. В этом случае массовая доля марганца в переходном слое паяного шва не менее 20...22 % и образования дефекта не происходит.

Работоспособность и надежность паяных соединений определяются не только технологическим процессом, но и эффективными методами контроля нагрева и последующего контроля качества готового изделия.

Длительное время отсутствие эффективного метода контроля температурного режима нагрева сдерживало широкое применение индукционной пайки в промышленности. Даже при хорошо отработанной технологии пайки в соединениях по ряду причин могут возникать различные дефекты (непропаи, поры, шлаковые включения). Многие конструкции паяных соединений с наличием дефектов считают неремонтопригодными. Поэтому наряду с известными методами контроля готовых изделий требовалась разработка принципиально нового метода активного контроля, обеспечивающего, в том числе, и слежение за процессом образования соединения деталей.

Наиболее перспективным методом контроля процесса образования паяного соединения является ультразвуковой. В институте металлургии им. А.Н. Байкова проведены исследования возможности использования ультразвуковых колебаний для оценки появления и наличия жидкой фазы припоя в паяльном зазоре. Предложен метод контроля, основанный на том, что при образовании спая между деталями устанавливается акустический контакт, наличие которого фиксируют соответствующей ультразвуковой аппаратурой. При наличии жидкого припоя между паяемыми поверхностями ультразвуковые колебания проходят через формируемый шов от излучающего к приемному преобразователю.

В МВТУ им. Н.А. Баумана проведены теоретические и экспериментальные исследования акустического тракта и разработаны методика и средства ультразвукового контроля паяных соединений в процессе и после окончания пайки. Особую значимость имеет способ определения момента расплавления припоя с помощью двух преобразователей, расположенных с обеих сторон паяемого стыка и включенных по раздельной схеме. Способ используется для автоматизации процесса пайки. Ультразвуковой контроль в процессе пайки трубопроводов диаметром 57...89 мм с толщиной стенки 3 мм показал практически 100%-ную надежность, что подтвердили последующие механические испытания паяных соединений [9].

Библиографический список

1. **Пайка** металлов: справочник / под ред. И.Е. Петрунина. М.: Машиностроение, 2003. 480 с.
2. **Применение** сквозного индукционного нагрева в промышленности / под ред. А.А. Фогеля. М.-Л.: Машиностроение, 1965. 96 с.
3. **Вологдин В.В., Кущ Э.В., Асамов В.В.** Индукционная пайка. Л.: Машиностроение. 1989. 76 с.
4. **Фогель А.А.** Индукционный метод удержания металлов во взвешенном состоянии. Л.: Машиностроение, 1979. 104 с.
5. **Дашдамиров Т.Д., Карабанов В.В.** Дефекты при индукционной пайке обсадных труб и пути их предотвращения // Сварочное производство. 1981. № 9. С. 26—29.
6. **Охотников В.А.** Индукционная плавка металлов: учеб. пособие. Уфа: УГАГУ, 1999. 42 с.
7. **Сварка** с электромагнитным перемешиванием / В.П. Черныш и др. Киев: Техніка. 1983. 127 с.
8. **Петрунин И.Е.** Физико-химические процессы при пайке. М.: Высшая школа. 1972. 280 с.
9. **Алешин Н.П., Медведев В.А.** Ультразвуковой контроль процесса пайки // XI Всесоюзная конференция "Неразрушающие физические методы и средства контроля". Москва. 1987.

УДК 620.162, 681.2, 62-531.7, 62-567.1

А.А. Емельяненко, *канд. техн. наук (НИИ гидросвязи "Штиль", г. Волгоград)*
E-mail: emelyanenko_aleksei@mail.ru

Особенности виброизоляции приборов гидроакустической связи на вертикальном фундаменте

Описан опыт виброизоляции приборов гидроакустической связи, отличающихся большой массой и габаритными размерами и устанавливаемых на вертикальном фундаменте. Приведены рекомендации по проектированию и доработке виброизолирующих систем консольно закрепляемых приборов.

Describes the experience of vibration isolation devices hydroacoustic communication, characterized by large weight and size and mounted on a vertical base. Recommendations for the design and finalization of anti-vibration systems console dockable devices.

Ключевые слова: виброизоляция, амортизатор, испытания, резонанс.

Keywords: vibration isolation, vibration absorber, testing, resonance.

В условиях ограниченной площади помещений (отсеков) судна весьма актуально крепление электронной аппаратуры, в частности приборов гидроакустической связи, к вертикальному фундаменту в два-три яруса, рационально используя объем и площадь помещения. При этом требуется виброизолировать консольно закрепляемые приборы. Задача эта тем серьезнее, чем больше момент инерции прибора относительно осей жесткости крепления, т. е. чем больше масса прибора, его габаритные размеры и вылет центра масс относительно фундамента. Упростить задачу, изменив соотношение габаритных размеров так, чтобы размер, перпендикулярный фундаменту, стал существенно меньше двух других, невозможно. Расчет же расположения виброизоляторов (амортизаторов) [4] покажет, что они должны быть максимально удалены от проекции центра масс на фундамент, друг от друга и в идеале вынесены за пределы корпуса. Это тоже невозможно — расположение амортизаторов почти всегда ограничено проекцией корпуса на фундамент. Располагать тяжелые крупногабаритные приборы на полу не позволяет ограниченная площадь.

Для преодоления динамической неуравновешенности виброизолирующих систем консольно закрепляемых приборов в АО "НИИ гидросвязи "Штиль" использовали прибор 4 (рис. 1): габаритные размеры 440×421×1160 мм, масса 90 кг; прибор 21 (рис. 2): габаритные размеры 640×346×443 мм, масса 63 кг; прибор 2: габаритные размеры 630×334×431 мм, масса 61 кг. В приборах применены амортизаторы АКСС-МХ.

Первоначально амортизаторы выбраны по нагрузке, близкой к их максимальной рабочей нагрузке по вертикальной оси, с учетом расположения и числа амортизаторов [3]. Для прибора 4 принято шесть амортизаторов АКСС-25МХ, для приборов 21 и 2 — по четыре амортизатора АКСС-25МХ (см. рис. 1, рис. 2, *б*).

В целях определения критических частот были проведены стендовые испытания приборов на амортизаторах в соответствии с ГОСТом как для виброизолированной аппаратуры группы 2.1 [1, 2].

Для прибора 4 измерены ускорения на верхних плоскостях блоков ЦВС (в нижней части прибора), КМ (в средней части прибора), ЦОС (в верхней части прибора) в диапазоне частот 0...35 Гц с шагом 5 Гц с ускорением на столе вибростенда 0,4 g (принято как безопасное для конструктивной целостности приборов в условиях предполагаемого резонанса (рис. 3)). Провели три серии замеров: в порядке возрастания, убывания и снова возрастания частоты возбуждающих колебаний (результаты на графиках получены как средние арифметические по трем сериям замеров).

График ускорений прибора 4 на амортизаторах АКСС-25МХ показывает два пика ускорений

в исследуемом диапазоне частот: на частотах 15 и 25 Гц. Оба пика являются резонансными — отношение ускорений, измеренных на приборе, к ускорению стола вибростенда превышает 2 [2]. Максимальное среднее значение ускорения 2,2 зафиксировано на блоке КМ на частоте 15 Гц. Кратность ускорению стола при этом составляет 5,5.

После воздействия одиночного вертикального удара с ускорением 40 g на прибор 4 обнаружено нарушение целостности — кольцевая трещина в резине всех шести амортизаторов.

Наличие двух пиков ускорения, очевидно, связано с недостаточной жесткостью корпуса прибора, позволяющего каждой из обособленных значительных масс блоков ЦВС и ЦОС раскачивать прибор на собственной резонансной частоте. Численные значения резонансных частот и неудовлетворительное сопротивление удару обусловлены недостаточной динамической и ударной жесткостью самих амортизаторов. Поэтому были приняты следующие конструктивные меры. Усилена конструкция корпуса: увеличена жесткость корпуса за счет присоединения продольного вертикального швеллера к задней стенке и введения накладок, связывающих боковые стенки корпуса с боковыми стенками блока ЦВС (см. рис. 1). Амортизаторы АКСС-25МХ заменены на АКСС-40МХ. Принято вертикальное (вместо чередующегося с горизонтальным) расположение общей оси присоединительных отверстий всех амортизаторов, т. е. суммарная вертикальная рабочая нагрузка амортизаторов доведена до 240 кгс (2354 Н) [против 120 кгс (1177 Н)]. Увеличена динамическая и ударная жесткость амортизаторов.

Проведены повторные измерения ускорения. В исследуемом диапазоне частот зафиксирован один пик ускорений (см. рис. 3). Максимальное среднее значение ускорения 0,67 g зафиксировано на блоках ЦВС, КМ, ЦОС на частоте 25 Гц. Кратность ускорению стола при этом составляет 1,7, что ниже резонансного значения. Целостность амортизаторов и прибора после воздействия одиночного удара с ускорением 40 g не нарушена.

Сводный график ускорений (см. рис. 3) иллюстрирует снижение максимального ускорения прибора после замены амортизаторов в 3,3 раза и установление вместо двух пиков ускорений на частотах 15 и 25 Гц одного пика на частоте 25 Гц.

Испытания приборов 21 и 2 на четырех амортизаторах АКСС-25МХ остановлены уже на частотах 10...15 Гц из-за резонанса, опасного для целостности амортизаторов и внутренних компонентов прибора. Варианты с увеличением числа амортизаторов до шести и их различным расположением на задней стенке прибора ничего не дали. Приняли следующие конструктивные меры. Выполнена угловая рама с полкой сверху, увеличено до шести число амортизаторов АКСС-25МХ. Принята схема с четырьмя амортизаторами на задней стенке прибора и с двумя — на верхней. Расстояния между амортизаторами по всем осям увеличены до максимально возможных. Провели измерения ускорений в двух точках верхней стенки приборов: слева сверху спереди и справа сверху спереди, т. е. на максимальном радиусе качания относительно горизонтальной оси жесткости рамы (рис. 4). Максимальное среднее значение ускорения 3,4 g зафиксировано слева сверху спереди на частоте 25 Гц. Кратность ускорению стола составляет 8,5, что существенно выше установленной границы резонанса [2].

Приняли новую схему амортизации: четыре амортизатора на задней стенке, два — на нижней; рама выполнена с полкой снизу. Все шесть амортизаторов — АКСС-25МХ. Провели повторные измерения на тех же режимах (см. рис. 4). Максимальное ускорение 2,45 g зафиксировано слева сверху спереди на частоте 20 Гц. Кратность ускорению стола составляет 6,1.

После воздействия одиночного удара с ускорением 40 g на прибор 21 обнаружено нарушение целостности (кольцевая трещина в резине) двух амортизаторов, расположенных на задней стенке прибора по верхней линии. Аналогичные результаты были получены для прибора 2. Но в обоих случаях предпочтительнее опирание прибора на амортизаторы по сравнению с подвешиванием к ним. Основная причина резонанса и разрушения амортизаторов при ударе — недостаточная динамическая и ударная жесткость, т. е. недостаточность условия выбора амортизаторов по максимальной рабочей нагрузке, отсутствие учета вылета центра масс прибора, его момента инерции.

Окончательно в приборах 21 и 2 все амортизаторы АКСС-25МХ заменили на АКСС-40МХ. Приняли вертикальное расположение общей оси присоединительных отверстий амортизаторов верхней линии на задней стенке, горизонтальное расположение общей оси присоединительных отверстий амортизаторов нижней линии на задней стенке и направление, перпендикулярное задней стенке, общей оси присоединительных отверстий амортизаторов на нижней стенке.

Провели измерения ускорений в трех точках верхней стенки приборов: слева сверху спереди, посередине сверху сзади, справа сверху спереди. Значения ускорений в точке, ближайшей к вертикальной плоскости амортизаторов, весьма близки к ускорению стола, поэтому не приведены на графике (см. рис. 4). Максимальное ускорение 0,85g зафиксировано слева сверху спереди на верхней

стенке на частоте 30 Гц. Кратность ускорению стола при этом составляет 2,1 (приграничное, но лежащее в резонансной области значение).

Целостность амортизаторов и прибора после воздействия одиночного удара с ускорением 40g не нарушена.

Сводный график ускорений прибора 21 (см. рис. 4) иллюстрирует снижение максимального ускорения прибора после замены амортизаторов и переноса полки рамы вниз в 4,0 раза и перенос пика ускорений с частоты 25 Гц на частоту 30 Гц.

В приборе 2 зафиксировано снижение максимального ускорения прибора после замены амортизаторов в 1,5 раза — до 1,85g и перенос пика ускорений с частоты 20 Гц на частоту 30 Гц. Кратность ускорению стола при этом составляет 4,6, что по-прежнему является резонансом и обусловлено невозможностью по ряду причин обеспечить надлежащую жесткость рамы.

При испытаниях на прочность и устойчивость возможно снижение ускорения стола стенда в 2 раза против значения, соответствующего группе назначения, в диапазоне частот от 0,7 до 1,4 значения резонансной частоты. Поэтому в случае с приборами 21 и 2 в диапазоне частот от 21 до 35 Гц испытания на прочность и устойчивость проводят с безопасным ускорением стола 0,5 g, в остальном диапазоне 0...20 Гц — 1 g в соответствии с группой назначения.

Графики выявления критических частот озвучили, перенеся шкалу ускорений в диапазон слышимой частоты звука. Область дорезонансных ускорений поставлена в соответствие нижним четырем октавам из используемых десяти. Область ускорений, не превышающих ускорение стола, получила соответствие нижним двум октавам. Одновременно громкость звука получила градиент от максимума в середине диапазона используемых звуковых частот до нуля на верхних и нижних значениях. Таким образом, удалось придать "звучание" динамическому поведению прибора во всем диапазоне частот возбуждающих колебаний и, следовательно, получить возможность оценивать по высоте тона и силе звука качество виброизоляции прибора. Примеры сонограмм (звуковых записей в виде изображения) серии испытаний приборов 4 и 21 приведены на рис. 5. Воспроизведение осуществляется в свободно распространяемой программе Virtual ANS.

Рекомендации по виброизоляции консольно закрепляемых приборов:

— выполняя компоновку прибора, стремиться к совпадению проекций центра масс и геометрического центра прибора на фундамент и к минимальному удалению центра масс от фундамента;

— проектируя корпус прибора, обеспечивать максимальную собственную жесткость прибора, взаимную неподвижность его элементов;

— для тяжелых крупногабаритных приборов с большим вылетом центра масс относительно фундамента, т. е. большим моментом инерции относительно осей жесткости виброизолирующей системы, принимать амортизаторы на типоразмер больше рекомендуемого по максимальной рабочей нагрузке и при необходимости увеличивать число амортизаторов;

— проектируя виброизолирующую систему, стремиться к совпадению или к сближению центральных осей жесткости виброизолирующей системы и центральных осей инерции прибора к максимальному расстоянию между амортизаторами, а при возможности — к их выносу за пределы проекции корпуса прибора на фундамент; обеспечивать максимальную жесткость виброизолирующей конструкции, т. е. равенство ускорений элементов виброизолирующей конструкции ускорениям стола стенда;

— после изготовления каждого прибора следует своевременно (до начала стендовых испытаний на прочность и устойчивость изделия) проводить испытания по определению критической частоты прибора;

— при невозможности устранения резонанса или выведения его за нормируемый диапазон частот воспользоваться рекомендацией [2] о снижении вдвое ускорения возмущающих колебаний в диапазоне 0,7...1,4 резонансной частоты;

— с целью выявления влияния характеристик амортизаторов и виброизолирующих конструкций на качество виброизоляции визуализировать результаты испытаний по определению критических частот графиками и сонограммами;

— создавать базы типовых конструкторских решений виброизолирующих систем для групп приборов по массогабаритным характеристикам и назначению.

Библиографический список

1. **ГОСТ РВ 20.39.304—98.** Комплексная система общих технических требований. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование военного назначения. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам.

2. **ГОСТ РВ 20.57.305—98.** Комплексная система контроля качества. Аппаратура, приборы, устройства и оборудование. Методы испытаний на воздействие механических факторов.

3. **ГОСТ РВ 9320-001—2008.** Амортизаторы корабельные АКСС—МХ.

4. **Н0.445.003—66.** Руководящий технический материал радиопромышленности и электронной промышленности. Амортизация радиоэлектронной аппаратуры, ее узлов и элементов.

УДК. 621.9.048.6

В.Ф. Казанцев, *д-р физ.-мат. наук,* **Р.И. Нигметзянов, С.К. Сундуков,** *канд-ты техн. наук,*
Д.С. Фатюхин, *д-р техн. наук*
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ))
E-mail: sergey-lefmo@yandex.ru

Применение ультразвуковых колебаний различной поляризации при проведении разборочных операций

Процесс разборки соединений деталей занимает важное место в ремонтном производстве и отличается большой трудоемкостью. Часть разбираемых деталей оказывается повреждена в результате несовершенства технологии. Наложение продольных, радиальных и крутильных колебаний ультразвуковой частоты на сопряженные детали повышает интенсивность процесса разборки и снижает вероятность повреждения деталей.

The process of disassembly of the connection parts has an important place in repair, and is characterized by great complexity. Part of the parsed parts are damaged as a result of the imperfections of technology. Imposing ultrasonic frequency vibrations on mated parts allows to increase the intensity of the disassembly process and reduce the possibility of damage to the parts. In the article the use of longitudinal, radial and torsional oscillations.

Ключевые слова: разборка, соединение, ультразвук, колебания.

Keywords: disassembly, coupling, ultrasound, oscillations.

Разборка — важный этап в организации вторичного воспроизводства агрегатов. Именно на этой стадии формируются основные технологические потоки: годные для дальнейшей эксплуатации детали, детали утильные (восстановление которых экономически нецелесообразно) и детали, подлежащие восстановлению (восстановление прежних геометрических размеров, прочностных свойств, поверхности). Детали, годные к дальнейшей эксплуатации, оценивают визуально или с помощью специального контрольно-измерительного инструмента и диагностических карт, где указаны допустимые отклонения параметров.

Разборочный процесс включает в себя следующие виды работ: моечно-очистные, разборочные, подъемно-транспортные и контрольно-сортировочные [1]. От общей трудоемкости разборочного процесса на долю разборочных работ приходится 60...65 %. Организация процесса разборки автомобилей и агрегатов обычно проводится таким образом, чтобы совместить отдельные стадии разборки с операциями мойки и очистки [2].

Сохранность деталей, в том числе поверхностей, в процессе разборки агрегатов и узлов автомобиля — важнейший экономический фактор. Сопутствующие повреждения деталей должны быть сведены к минимуму. Некоторые повреждения деталей (срыв резьбы, забивание торцов вала, изгибы и поломки деталей, нарушение шероховатости поверхности валов и т. п.) часто происходят из-за несовершенства технологии.

Основным фактором, осложняющим разборку, являются силы трения в зазоре [3—5], сильно возрастающие в ходе эксплуатации узлов из-за коррозии, фреттинг-коррозии, загрязнений, полимеризации смазок, наличия абразивных частиц, микростружки, задиров и схватывания сопряженных поверхностей.

Из всех разновидностей соединений деталей автомобилей около 20 % составляют прессовые, около 70 % — резьбовые.

Нагрузки, вызывающие ослабление силового взаимодействия в соединении, по характеру воздействия разделяют на статические и динамические, ударные и безударные [6].

Цель работы — анализ возможностей применения ультразвуковых колебаний различной поляризации (продольные, радиальные, крутильные) для интенсификации процесса разборки соединений деталей.

Продольные колебания для разборки соосных соединений деталей

Для реализации процесса разборки необходимо, чтобы на внутреннюю деталь (втулку) одновременно с ультразвуковыми колебаниями действовала выталкивающая сила любой физической природы: тяжести извлекаемой детали (вала), гидравлическая [5, 7]. Силы, препятствующие разборке, — сила трения между сопрягаемыми поверхностями $F_{тр}$ и сила инерции извлекаемой детали $F_{ин}$.

При наложении ультразвуковых колебаний усредненная по времени сила трения приобретает характер вязкого трения, при малых скоростях относительного движения сила трения становится пропорциональной величине этой скорости [7]:

$$F_{тр} = -\eta\dot{y}, \qquad (1)$$

где $\dot{y}$ — скорость смещения внутренней делали относительно внешней;

η — коэффициент вязкого трения.

Сила инерции извлекаемой детали:

$$F_{ин} = -m\ddot{\xi}(t), \qquad (2)$$

где $\ddot{\xi}$ — ускорение внешней детали;

m — масса извлекаемой детали.

Определенный порядок пространственного расположения соединения деталей (источника ультразвуковых колебаний над разбираемым соединением, а упора — под ним) в условиях снижения трения под воздействием ультразвуковых колебаний позволяет использовать вес охватываемой детали $G = mg$ в качестве разбирающей силы (рис. 1).

Однако когда масса внутренней детали мала, ее веса не хватает для преодоления сил сопротивления. В этом случае интенсифицировать процесс разборки позволяет приложение внешнего давления. Через осевое отверстие в излучателе колебательной системы во внутреннюю полость охватывающей детали под давлением p подается жидкость. Кроме постоянной силы давления жидкости F_p, под действием ультразвуковых колебаний в разбираемом соединении возникает гидравлическая сила $F_г$. Колебательные смещения излучателя, жестко соединенного с внешней деталью (втулкой) относительно внутренней детали (вала), приводят к изменению давления в полости под излучателем. При движении излучателя вверх давление в полости понижается, и через отверстие внутрь разбираемого соединения поступает жидкость. При движении излучателя вниз часть жидкости, поступившей в полость, выталкивается, другая часть создает давление на извлекаемую деталь, что способствует ее постепенному выталкиванию [4, 7].

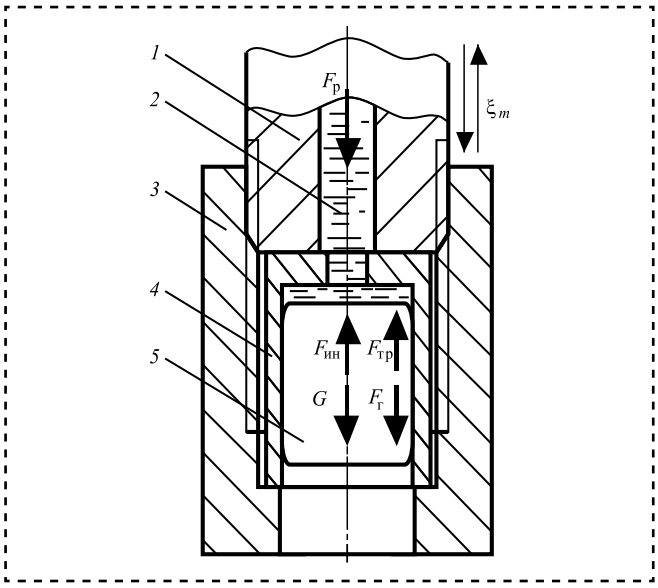


Рис. 1. Схема разборки соосного соединения:
1 — ультразвуковой излучатель; *2* — осевой канал; *3* — упор; *4* — внешняя деталь; *5* — внутренняя деталь

Баланс удерживающих и разбирающих сил в системе координат, связанной с втулкой, следующий:

$$m\ddot{y} = F_г(t) + mg + pS - m\ddot{\xi}(t) - \eta\dot{y}, \qquad (3)$$

где $\ddot{y}$ — ускорение смещения внутренней делали относительно внешней;

p — давление жидкости;

S — площадь поперечного сечения вала.

Радиальные колебания для разборки соосных соединений деталей

Одним из путей повышения эффективности процессов сборки и разборки соосных и резьбовых соединений является применение радиальных колебаний.

В разработанной экспериментальной установке радиальные колебания возбуждаются в гладкой коаксиальной паре с помощью дискового концентратора тремя стержневыми магнитострикционными преобразователями (рис. 2). Электрическое напряжение на них подается от генератора. Для поддержания заданного режима на внешней цилиндрической поверхности диска расположен датчик обратной связи. Электрическое напряжение с датчика обратной связи поступает на вход компьютера. В результате обработки поступающей информации с выхода компьютера на вход генератора поступает управляющий сигнал.

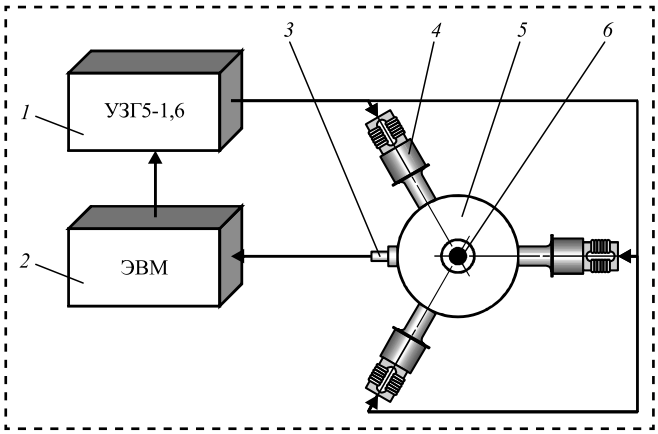


Рис. 2. Структурная схема экспериментальной установки: *1* — генератор; *2* — персональный компьютер; *3* — датчик; *4* — УКС (стержневой магнитострикционный преобразователь); *5* — дисковый концентратор; *6* — разбираемое соединение

Для разборки необходимо, чтобы на внутреннюю деталь разбираемого соединения действовала сила, имеющая постоянную во времени составляющую. Такой силой является сила тяжести, а при разборке в жидкой технологической среде к ней добавляются силы гидродинамического происхождения. При слабом механическом натяге ультразвуковые колебания практически не передаются от внешней детали на извлекаемую внутреннюю деталь, поэтому при расчетах можно полагать, что амплитуда колебаний на внешней поверхности извлекаемой детали отсутствует. В то же время амплитуда на внутренней цилиндрической поверхности втулки постоянна и равна ξ_{rm}. Если механический натяг $\xi_0 < \xi_{rm}$, то в определенные промежутки времени на границе вал—втулка физический контакт будет полностью отсутствовать и сила трения на границе будет равна нулю. Извлекаемая внутренняя деталь массой m под действием приложенной силы F_0 будет перемещаться вдоль оси системы. Величину перемещения можно рассчитать, если известен промежуток времени t_0, в течение которого контакт между деталями отсутствует:

$$t_0 = T - 2\tau_0,$$

где $T = 1/f$;

f — частота ультразвуковых колебаний;

$$\tau_0 = \frac{1}{\pi f}\arccos\left(\frac{\xi_0}{\xi_{rm}} - 1\right).$$

В течение времени t_0 извлекаемая внутренняя деталь сместится на величину

$$s = \frac{at_0^2}{2},$$

где $a = F_0/m$.

За один период произойдет относительное смещение деталей на величину, равную:

$$s = \frac{F_0}{\pi^2 m f^2}\left[\pi - \arccos\left(\frac{\xi_0}{\xi_{rm}} - 1\right)\right]^2.$$

Средняя скорость перемещения разбираемой детали:

$$V = \frac{F_0}{\pi^2 m f}\left[\pi - \arccos\left(\frac{\xi_0}{\xi_{rm}} - 1\right)\right]^2.$$

При $\xi_0 = \xi_{rm}$ значение скорости обращается в ноль, значит, существует критическая амплитуда ультразвуковых колебаний, ниже которой ультразвук не оказывает никакого воздействия, с увеличением амплитуды скорость разборки будет увеличиваться.

Крутильные колебания для разборки резьбовых соединений

Актуальной задачей, решаемой при разработке сборочно-разборочных операций, является интенсификация технологий сборки и разборки резьбовых соединений.

Поскольку сила сборки и разборки резьбовых соединений складывается из трения в резьбе (30...40 % от общей силы), трения торца гайки и болта о собираемые поверхности (40...50 %) и силы затяжки (10...20 %), наложение ультразвуковых колебаний способствует значительному снижению трения в элементах резьбы и позволяет повысить качество соединения [8—10].

Разборка и сборка резьбовых соединений могут осуществляться с использованием колебаний, имитирующих вращение гайки (болта), т.е. крутильных.

В качестве технического решения, позволяющего преобразовать продольные колебания ультразвукового преобразователя в крутильные, использовали устройство, представленное на рис. 3.

На ультразвуковом преобразователе *1* закреплена коронка *3* (ведущая). При входе в зацепление коронок *3* (ведущей) и *4* (ведомой) за счет скольжения их наклонных плоскостей продольные колебания ультразвукового преобразователя *1* преобразуются в крутильные колебания коронки *4* (ведомой). Коронки прижимаются силой *P*, прилагаемой к ультразвуковому преобразователю. Обойма *2* препятствует осевому смещению коронок *3* и *4*. В коронку *4* устанавливают головку-переходник *5* для закрепления откручиваемого элемента резьбового соединения.

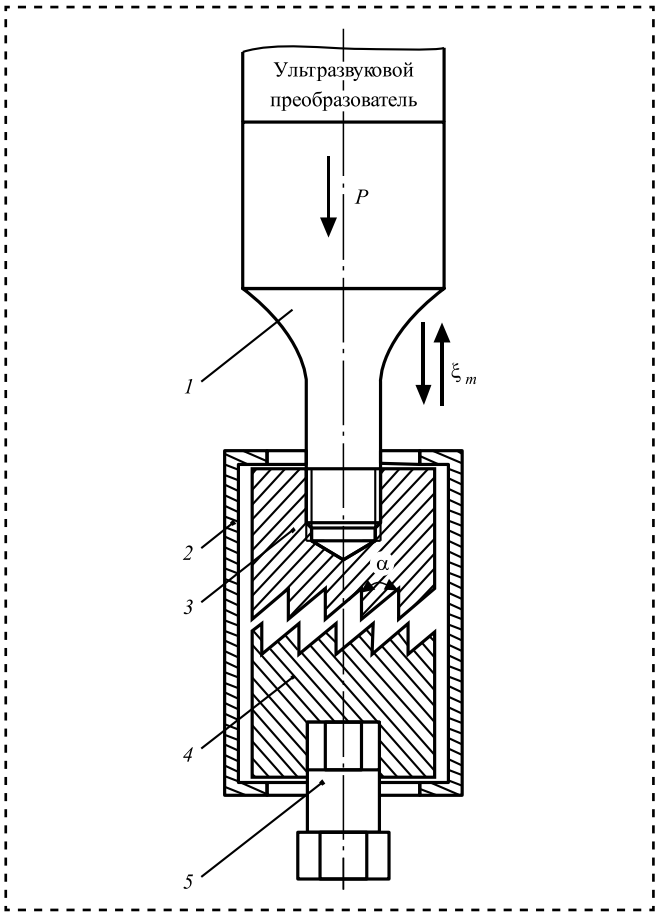


Рис. 3. Ультразвуковой инструмент для разборки резьбовых соединений:
1 — ультразвуковой концентратор; *2* — обойма; *3*, *4* — коронки; *5* — головка-переходник

С увеличением угла наклона зубьев коронки α сила откручивания уменьшается, однако увеличивается смещение.

Учитывая, что $F_{откр} = F_{прод}\cos\alpha$, а $x = \xi_m \sin\alpha$, принимаем угол $\alpha = 30°$.

Угол поворота φ за время сборки (разборки) *t*:

$$\varphi = tf \operatorname{arctg}\left(\frac{\xi_m \sin\alpha}{r}\right),$$

где *f* — частота колебаний;

r — радиус коронки.

Амплитуда колебаний оказывает значительное влияние на изменение момента закручивания (откручивания) резьбовых соединений. Наибольший результат наблюдается при достижении амплитуд колебания излучателя ξ_m = = 20...25 мкм, при которых момент закручивания (откручивания) снижается до 2 раз. Дальнейшее увеличение амплитуды колебаний не приводит к повышению технологического эффекта.

Выводы

Любая сопряженная пара деталей является гетерогенной системой, в которой при правильно выбранном внешнем механическом воздействии могут создаваться разностные межэлементные силовые реакции, приводящие к дезинтеграции (к разборочным перемещениям в системе).

Повысить эффективность разборки соединений деталей можно применяя ультразвуковые колебания различной поляризации: продольные, радиальные и крутильные. При наложении колебаний на разбираемые соединения изменяется баланс удерживающих и разбирающих сил, что приводит к ускорению процесса разборки и снижает вероятность повреждения разбираемых деталей.

Библиографический список

1. **Пантелеенко Ф.И., Лялякин В.П., Иванов В.П., Константинов В.М.** Восстановление деталей машин: справочник / под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.

2. **Канарчук В.Е., Чигринец А.Д., Голяк О.Л., Шоцкий П.М.** Восстановление автомобильных деталей: Технология и оборудование: учебник для вузов. М.: Транспорт, 1995. 303 с.

3. **Приходько В.М., Кудряшов Б.А., Багров И.В.** Опыт внедрения технологий и оборудования в основном и ремонтном производстве // Международ. науч.-техн. конф. "Ультразвук в технологии машиностроения—91". Архангельск: Севмашвтуз, 1991. С. 229—232.

4. **Елизаров В.А.** Разработка технологии и оборудования по разборке с помощью ультразвука закоксованных прецизионных узлов автомобиля при ремонте: дис. ... канд. техн. наук. М., 1988. 176 с.

5. **Нигметзянов Р.И.** Совершенствование технологии ремонта топливной аппаратуры на автотранспортных предприятиях с помощью ультразвука: дис.... канд. техн. наук. М., 1999. 178 с.

6. **Ланщиков А.В., Селиверстов А.А.** Диагностическое обеспечение операций сборки резьбовых соединений // Известия МГТУ "МАМИ", 2008. № 2 (6). С. 287—290.

7. **Приходько В.М.** Ультразвуковая разборка. М.: МАДИ (ТУ), 1995. 94 с.

8. **Штриков Б.Л., Шуваев И.В.** Повышение качества резьбовых соединений в условиях ультразвуковых воздействий // Высокие технологии в машиностроении: материалы Междунар. науч.-техн. конф. Самара. 2004. С. 117.

9. **Штриков Б.Л., Шуваев И.В.** Обеспечение качества сборки резьбовых соединений // Обеспечение и повышение качества машин на этапах их жизненного цикла: материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф. Брянск: БГТУ, 2005. 190 с.

10. **Штриков Б.Л., Шуваев В.Г., Шуваев И.В.** Обеспечение надежности и качества механических соединений при ультразвуковой сборке // Актуальные проблемы надежности технологических, энергетических и транспортных машин: материалы Междунар. конф. Самара. 2003. С. 127—129.

УДК 621.91.06:658.562.64

И.А. Давлетшин, *(НИИ "Гермес"),* **А.В. Медарь,** *д-р техн. наук (НПО "Техномаш"),*
К.А. Барон, С.В. Чернышов *(НИИ "Гермес")*
E-mail: tm230@yandex.ru

Конструктивно-технологическое обеспечение собираемости и взаимозаменяемости агрегатов изделий по фланцевым стыкам

Рассмотрены вопросы обеспечения собираемости и взаимозаменяемости агрегатов изделий по фланцевым стыкам при различных методах изготовления, автоматизации сопутствующих расчетов. Предложена разработка программного обеспечения расчетов обеспечения собираемости и взаимозаменяемости, не требующего знания исполнителем специализированных программных средств.

In this work considered problem ensuring assimilability and interchangeability units productions all along flanged junctions at different methods making, automation accompany calculations. Suggest software development calculations ensuring assimilability and interchangeability, not demand of knowledge executor special-purpose software.

Ключевые слова: фланцевый стык, собираемость и взаимозаменяемость, зависимая и независимая обработка, программное обеспечение расчетов.
Keywords: flange joint, assimilability and interchangeability, dependent and independent machining, software ensuring calculations.

Одной из важнейших технических задач, решение которой позволяет рационально организовать производство изделий ракетно-космической техники (РКТ) с необходимым уровнем качества изготовления, является обеспечение собираемости и взаимозаменяемости агрегатов по фланцевым стыкам.

Основные методы и средства обеспечения взаимозаменяемости деталей и сборочных единиц при разработке конструкторской документации и технологической подготовке производства установлены отраслевым стандартом ОСТ 92-0157—82, в котором рассмотрены варианты обеспечения взаимозаменяемости при независимом и зависимом методах изготовления.

В настоящее время предприятия отрасли накопили значительный опыт решения задачи обеспечения собираемости агрегатов изделий различного назначения и габаритов, однако сопутствующие размерные расчеты в процессе конструктивно-технологической проработки точностных требований к стыкам и эталонной оснастке проводятся в основном вручную, трудоемки и требуют соответствующей квалификации специалистов.

В производстве изделий РКТ используют два метода обеспечения собираемости агрегатов: независимого и зависимого изготовления.

Метод независимого изготовления применяют при изготовлении жестких деталей, которые не меняют свои геометрические параметры под действием массовых сил, с поверхностями простой геометрической формы (цилиндр, конус, плоскость, резьбовая поверхность). Он основан на принципе изготовления стыкуемых деталей по заданным в чертежах деталей размерам и допускам (рис. 1).

Взаимозаменяемость в данном случае обеспечивается обоснованно назначенными и выполненными в производстве размерами и допусками на них, соответствующим технологическим оборудованием, режущим и мерительным инструментом, обеспечивающим выполнение заданных в чертежах размеров и допусков.

Основная задача конструктора (расчетчика) на этапе проектирования — назначение обоснованных значений размеров, допусков расположения и формы стыковочных элементов, которые могут быть установлены: на основе опыта разработки, производства и эксплуатации аналогичных изделий или размерных расчетов.

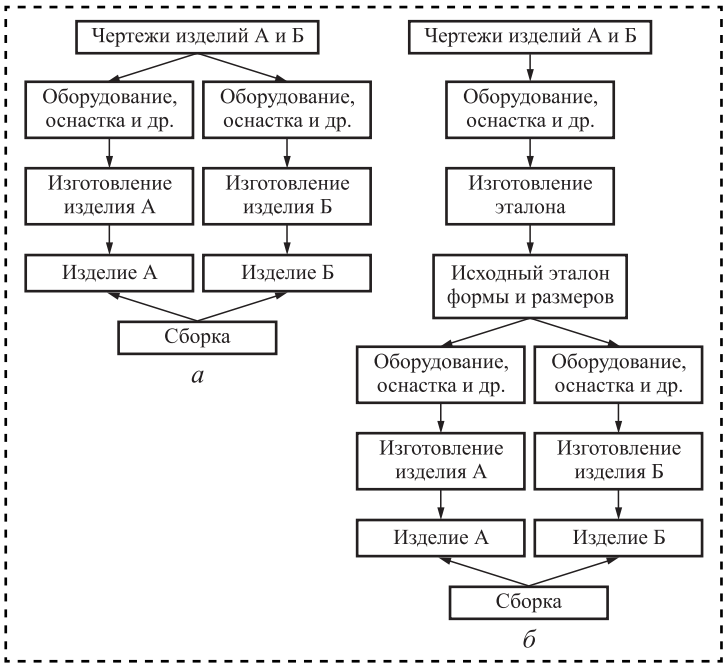


Рис. 1. Структурная схема изготовления изделий А и Б при независимом (*а*) и зависимом (*б*) методах производства

Метод зависимого изготовления применяют при изготовлении деталей малой жесткости (меняющей свои геометрические параметры в зависимости от ориентации в пространстве под действием массовых сил), сложной геометрической формы и больших размеров, рабочей технологической оснастки по эталонной оснастке, т.е. жестким плоским и пространственным носителям форм и размеров изделий (см. рис. 1). Он основан на принципе изготовления для каждого ставящегося на производство изделия эталонной оснастки (мастер-кондуктора), увязанной с ним рабочей технологической оснастки (рабочий кондуктор, контрольный эталон).

Основные особенности метода:

— изготовление и применение мастер-кондуктора (МК) для изготовления и увязки по нему соответствующих рабочих кондукторов (для изготовления по ним изделия) и контрольных эталонов (для контроля изготовленных по рабочим кондукторам изделий без применения универсальных приборов и средств измерения);

— необходимость периодического согласования (отстыковки) эталонной оснастки кооперирующихся предприятий и соответствующей рабочей технологической оснастки.

Под увязкой технологической оснастки понимают процесс, начинающийся с изготовления производственного эталона (мастер-кондуктора) изделия и заканчивающийся перенесением его формы и размеров на связанную с ним рабочую и контрольную оснастку (рабочий кондуктор, контрольный эталон) с требуемой точностью.

При кооперированном изготовлении изделий наряду с изготовлением МК изготавливают его дублер (ДМК), который используют на втором предприятии аналогично мастер-кондуктору. В этом случае необходима периодическая отстыковка ДМК и МК (рис. 2).

При применении метода зависимого изготовления собираемость и взаимозаменяемость изделий обеспечивается назначением соответствующих допусков на размеры стыкуемых изделий (диаметры стыковочных буртов, отверстий, допуски диаметральных размеров стыковочных штифтов, шпилек). Это требует проведения соответствующих размерных расчетов, связанных с определением погрешностей переноса размеров с МК на соответствующие рабочие кондукторы при их изготовлении, а также с погрешностями изготовления деталей по рабочим кондукторам. В процессе расчетов необходимо учитывать наличие промежуточных деталей (втулок) между стыковочными элементами (шпильками, штифтами) и отверстиями в стыкуемых деталях.

Алгоритм размерных расчетов сложный, включает несколько этапов стыковки, когда происходит взаимодействие различных элементов стыкуемых деталей, зависит от типа применяемого стыка (с центрирующим буртом, без бурта, с цилиндрическими и ромбическими штифтами, однорядный или двухрядный (торовый) стык).

Сначала происходит согласование стыковочных отверстий под штифты и шпильки с обеспечением 100%-ной собираемости (рис. 3). Этап I: начало стыковки, работают штифты (рис. 4). Условие собираемости:

$$\left(\Delta_{\text{шт}} + \Delta_0\right)_{\text{ц}} + \left(\Delta_{\text{шт}} + \Delta_0\right)_{\text{р}} \leqslant \frac{1}{2}\left(z_{\text{ц}} + z_{\text{р}}\right).$$

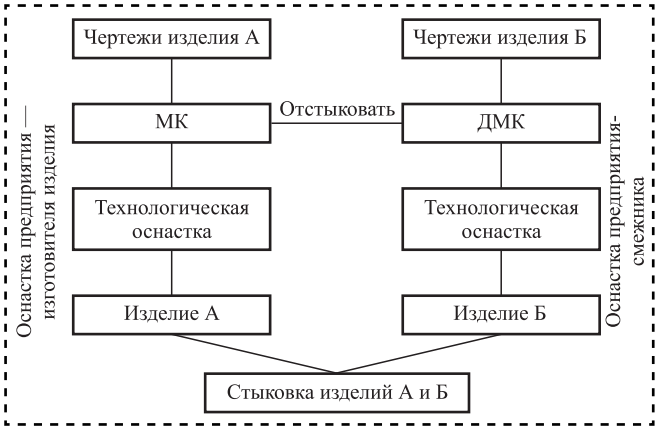


Рис. 2. Схема отстыковки эталонной и рабочей технологической оснастки кооперирующихся предприятий

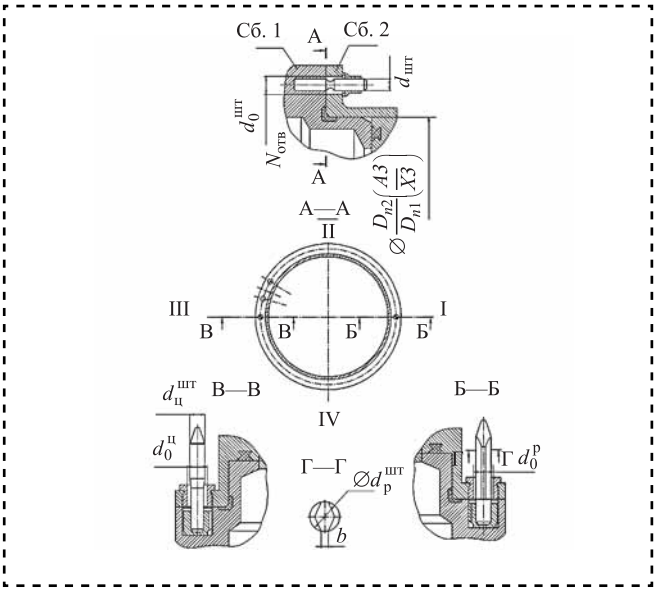


Рис. 3. Согласование стыковочных отверстий корпусов под штифты и шпильки Сб.1 и Сб.2 с обеспечением 100%-ной собираемости

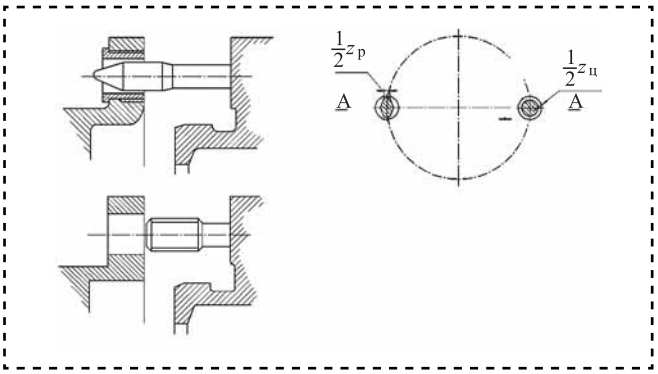


Рис. 4. Этап I: начало стыковки, работают штифты

Этап II: работают штифты, включаются шпильки (рис. 5). Условие собираемости:

$$\begin{cases}(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{ц}}+(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{р}}\leqslant\dfrac{1}{2}(z_{\text{ц}}+z_{\text{р}});\\(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)+(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{ц}}\leqslant\dfrac{1}{2}(z_{\text{шп}}+z_{\text{ц}})\ \text{при}\ z_{\text{ц}}<z'_{\text{р}}\end{cases}$$

или

$$\begin{cases}(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{ц}}+(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{р}}\leqslant\dfrac{1}{2}(z_{\text{ц}}+z_{\text{р}});\\(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)+(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{р}}\leqslant\dfrac{1}{2}(z_{\text{шп}}+z'_{\text{р}})\ \text{при}\ z'_{\text{р}}<z_{\text{ц}}.\end{cases}$$

Этап III: переход к центрированию по бурту, работают штифты, шпильки и D_n (рис. 6). Условие собираемости:

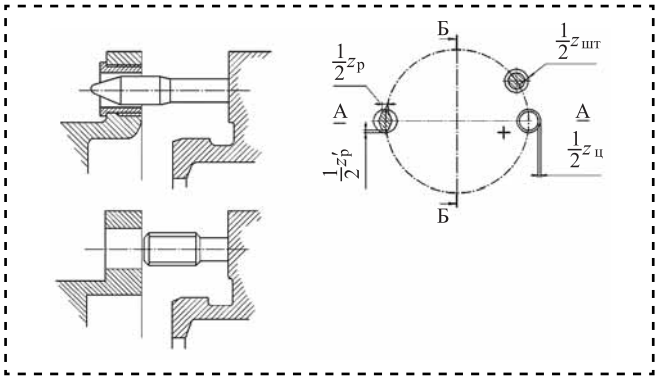


Рис. 5. Этап II: работают штифты, включаются шпильки

1) $\max\Delta_z < 0$ $z_{\text{р}} < z'_{\text{ц}}$

$$\begin{cases}(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{р}}+(E_{\text{ш}}+E_0)\leqslant\dfrac{1}{2}(z_0+z_{\text{р}})\\\text{— в пл. А—А (направление}\ \leftrightarrow);\\\dfrac{1}{2}\left[(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{ц}}+(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{р}}\right]+(E_{\text{ш}}+E_{\text{р}})\leqslant\\\leqslant\dfrac{1}{2}z_0+\dfrac{1}{4}(z'_{\text{ц}}+z'_{\text{р}})\\\text{— в пл. Б—Б (направление}\ \updownarrow);\\\dfrac{1}{2}\left[(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0^{\text{шп}})+(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{р}}\right]+(E_{\text{ш}}+E_0)\leqslant\\\leqslant\dfrac{1}{2}z_0+\dfrac{1}{4}(z_{\text{шт}}+z'_{\text{р}})\ \text{или}\ z_{\text{шп}}+z'_{\text{ц}}.\end{cases}$$

При этом

$$(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{ц}}+(\Delta_{\text{шт}}+\Delta_0)_{\text{р}}\leqslant\frac{1}{2}(z_{\text{ц}}+z'_{\text{р}}).$$

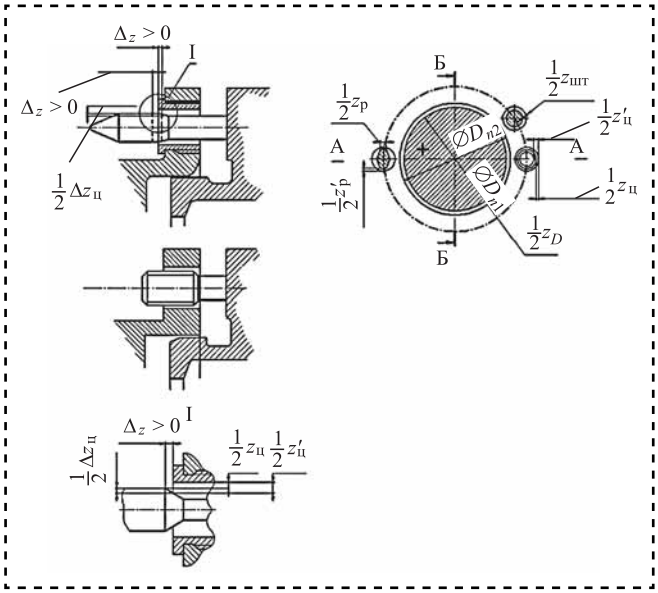


Рис. 6. Этап III: переход к центрированию по бурту, работают штифты, шпильки и D_n

2) $\max\Delta_z \geqslant 0$ $z_ц < z_р$

$$\begin{cases} (\Delta_{шт} + \Delta_0)_ц + (E_ш + E_0) \leqslant \frac{1}{2}(z_D + z_ц); \\ \frac{1}{2}\left[(\Delta_{шт} + \Delta_0)_ц + (\Delta_{шт} + \Delta_0)_р\right] + (E_ш + E_0) \leqslant \\ \leqslant \frac{1}{2}z_0 + \frac{1}{4}(z_ц + z'_р); \\ \frac{1}{2}\left[(\Delta_{шт} + \Delta_0^{шп}) + (\Delta_{шт} + \Delta_0)_р\right] + (E_ш + E_0) \leqslant \\ \leqslant \frac{1}{2}z_D + \frac{1}{4}(z_{шп} + z'_р) \text{ или } z'_р + z_ц. \end{cases}$$

При этом

$$(\Delta_{шт} + \Delta_0)_ц + (\Delta_{шт} + \Delta_0)_р \leqslant \frac{1}{2}(z_ц + z_р).$$

Этап IV: работают штифт ромбический, шпильки и D_n; цилиндрический штифт разряжен (рис. 7). Условие собираемости: см. случай 1 этапа III при $z'_ц = z''_ц$

Необходим учет большого числа входящих погрешностей, связанный с особенностями и технологией изготовления эталонной и рабочей оснастки (рис. 8).

Проведение соответствующих расчетов по этой методике сложно и требует высокой квалификации расчетчика. Модули по расчету геометрии программных комплексов, Catia, T-Flex, Solid-Works не предусматривают наличия специальных возможностей по расчету именно стыков, стоимость указанных продуктов весьма высока.

Вместе с тем достигнутый в настоящее время уровень вычислительной техники (современные ПК, типовое программное обеспечение

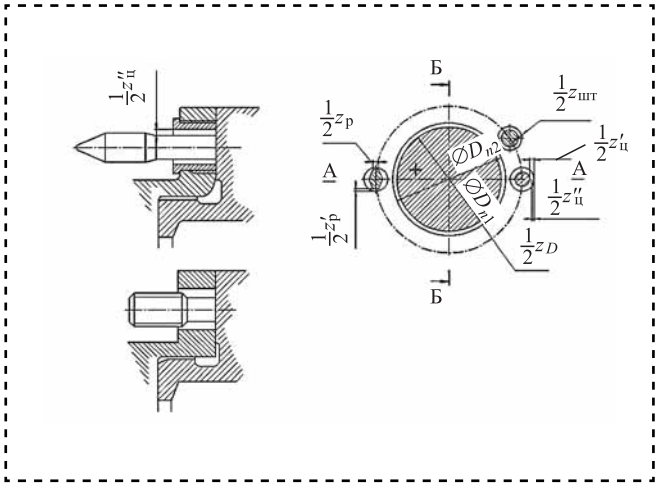


Рис. 7. Этап IV: работают штифт ромбический, шпильки и D_n; цилиндрический штифт разряжен

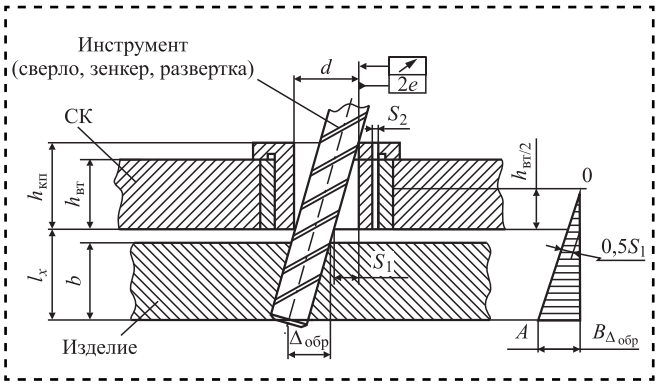


Рис. 8. Схема обработки отверстий по кондуктору:
l_x — вылет инструмента (глубина сверления); $h_{вт}$ — высота сменной кондукторной втулки; $h_{кп}$ — толщина кондукторной плиты; S_1 — зазор по посадке сменная втулка—инструмент; S_2 — зазор по посадке постоянная втулка—сменная втулка; e — эксцентриситет сменной втулки; b — толщина обрабатываемой детали

ПО) позволяет создать на их основе специализированную программу расчетов, обладающую понятным конструктору интерфейсом, в котором отражены варианты применяемых стыков, методы изготовления (зависимый, независимый), предварительно назначенные размеры и допуски стыкуемых деталей, обеспечивающую проведение необходимых размерных расчетов с оценкой собираемости рассматриваемого стыка и выдачу рекомендаций по корректировке заложенных размеров и допусков на них.

Данное ПО создано на основе табличного процессора Microsoft Excel.

При необходимости программа может быть расширена с введением расчетов размеров контрольной оснастки — контрольных эталонов, калибров-пробок.

Разрабатываемые программно-методические средства используют в процессе подготовки производства перспективных изделий машиностроения, а также в отраслях промышленности при изготовлении различной продукции с крупногабаритными стыками (нефтехимия, газовая промышленность, энергетическое машиностроение).

Библиографический список

1. **ОСТ 92-0157—82.** Изделия отрасли. Методы и средства обеспечения взаимозаменяемости.

2. **Методика** оценки собираемости (технологичности) фланцевых стыков при зависимой обработке агрегатов. Южно-Уральский филиал НИИТМ, 1975.

УДК 665.71; 543.544.33

К.Н. Долгополов, И.В. Колесников, *канд-ты техн. наук*
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
E-mail: lik.lab061@gmail.com

Исследования состава нефтяных остатков как перспективного сырья производства масел*

Проведен анализ методов определения группового углеводородного состава сырьевых материалов — тяжелых нефтяных остатков. Идентификация количественного группового углеводородного состава сырья позволяет спрогнозировать свойства остаточных масел, получаемых в процессе переработки гудронов. Приведены результаты газовой хроматографии для идентификации компонентов нефтепродуктов: масел, смол. Предложен полуколичественный критерий оценки содержания масляных и смолистых фракций в гудронах, позволяющий ускорить процедуру отбора сырьевой базы для производства остаточных масел.

Analyses of the methods of definition of group hydrocarbon composition of raw materials — heavy oil remains is carried out. Identification of qualitative group hydrocarbon composition of raw material to predict properties of remaining oils received in the process of goudrons (tar oils) retreatment. The results of gas chromatography for identification of the components of petroleum products: oils, resins are given. Carried out semi qualitative criterion of evolution of oil and resin fractions contents in goudrons, giving the possibility of accelerating the procedure of selection of the base for remaining oils production is proposed.

Ключевые слова: гудрон, хроматографический анализ, групповой углеводородный состав, парафины.

Keywords: goudron (tar oils), chromatographic analysis, group hydrocarbon analyses, paraffin's.

Постепенное истощение запасов высококачественной малосернистой нефти, нефти с низким содержанием смол и парафинов, а также общий рост доли тяжелой нефти в объеме мировой нефтедобычи актуализирует переработку нефтяных остатков малосернистого сырья и создание новых способов его переработки. Косвенным подтверждением намеченной тенденции служит сложившийся на данный момент вектор вложения средств крупных нефтеперерабатывающих компаний в совершенствование процессов вторичной переработки газойлей [1], мазутов и гудронов. Гудроны могут быть рассмотрены как перспективный материал не только для тривиального производства битумных вяжущих, но также для получения остаточных масел [2]. Для изготовления остаточных масел гудроны направляют на установки деасфальтизации, депарафинизации, деметаллизации, гидрообессеривания, гидроочистки для выделения базовых (гидросинтетических) основ, которые затем смешивают с функциональными добавками, получая товарные смазочные материалы, в том числе и на основе битумных вяжущих для прокатных станов металлургической промышленности [3].

Важную роль в обеспечении эффективности процессов переработки сырья и качества товарных смазочных материалов играют методологические принципы выбора сырьевой базы, обеспечивающие: высокие индекс вязкости, смазывающую способность, термоокислительную стабильность, нагрузочно-скоростной и температурный диапазоны эксплуатации смазочных материалов. Правила подбора сырья при производстве смазочных материалов из гудронов объединены общими требованиями к наименьшему содержанию:

— парафинов, ухудшающих низкотемпературные свойства масел, нарушающих коллоид-

* Работа выполнена за счет средств гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00116), организация ФГБОУ ВО РГУПС.

ную структуру битумных вяжущих как основы специальных смазок, их адгезионные и низкотемпературные свойства;

— асфальтенов, которые при термическом воздействии в ходе переработки гудронов служат источником карбенов и карбоидов, ухудшающих трещиностойкость смазок на основе битумных вяжущих, стабильность против окисления масел, являются источником нагарообразования и повышенной коксуемости;

— смолистых веществ, которые затрудняют кристаллизацию твердых углеводородов в процессе депарафинизации, препятствуют адсорбции серосодержащих соединений и высокомолекулярных ароматических углеводородов при адсорбционной очистке сырья, ухудшают показатели гидроочистки масел, дезактивируя катализаторы этих процессов, ухудшают вязкостно-температурные свойства, являются источником лакообразования и чрезмерного изменения цвета товарного продукта.

Асфальтосмолистые парафиновые вещества имеют высокую молекулярную массу, склонны к конденсации и взаимному превращению в процессе термического воздействия, они затрудняют перегонку нефтей, мазутов, ускоряя закоксовываемость перегонных аппаратов, вызывают отложения на стенках подводящих трубопроводов. Интенсивность процессов определяется химическим составом асфальто-смолистых парафиновых веществ и исходного нефтяного сырья.

Прогнозирование эксплуатационных свойств товарных продуктов возможно по соотношению компонентов группового состава нефтепродуктов. Идентификацию группового состава проводят методами, основанными на разделении смесей действием селективных растворителей (адсорбционные методы анализа остаточных нефтепродуктов, методы колоночной хроматографии): ASTM D 4124—97, ONOM C 9220, "горячий" и "холодный" методы Гольде, методика ВНИИ НП и т.д. Перечисленные методы трудоемки, занимают до 24 ч и более, сопряжены с неизбежными потерями, но оказываются малопригодными для исследовательских работ по химической кинетике процессов нефтепереработки, так как практически не несут в себе причинно-следственную связь относительно выбора технологических режимов производства и их влияния на структурные превращения исходного сырья. В сложной многокомпонентной системе, какой является тяжелый нефтяной остаток, нет резких переходов между полициклическими углеводородами и смолами, между смолами и асфальтенами, что объясняется небольшой разницей между типами их молекул (отличие состоит в содержании углерода и средней величине молекулы), поэтому при осаждении асфальтенов высокомолекулярные смолы, близкие по строению, также осаждаются в тех или иных количествах.

Условия сушки, нагрева и охлаждения в стандартных методиках оказывают существенное влияние на молекулярную массу асфальтенов, на их агрегирование и набухание. Определяющее влияние оказывает и тип растворителя. Переход с одного растворителя на другой приводит к заметному искажению результатов. Информация, полученная различными экстракционными/адсорбционными методами, недостаточно достоверна, с малой сходимостью результатов, поэтому предлагается заменять или дополнять стандартные методы физического разделения смесей хроматографическим методом анализа их состава, как более точно характеризующим их технологические свойства.

Методика исследования

Пробы гудронов исследовали методами разделения селективными растворителями. Разделение образца гудрона по групповому составу осуществляли с использованием 40-кратного избытка петролейного эфира для осаждения асфальтенов. Выделение твердых парафинов проводили по ГОСТ 11851—85.

Углеводородный состав остатка, масел, смол, парафинов определяли на газовом хроматографе GS-450 (фирмы "Bruker", США) с пламенно-ионизационным детектором методом имитированной разгонки (SimDist) путем определения точек кипения нефтяных масел или сходных углеводородных веществ, учитывая процент отгона. Это универсальный метод разделения смесей, испаряющихся без разложения. Газноситель — водород. Хроматограф оснащен автоматической системой анализа, обработки и хранения данных Galaxie.

В качестве образца готовили раствор гудрона, экстрагированных масел, смол, парафинов в сероуглероде (CS_2, степень чистоты 99 %), служащего для снижения вязкости, уменьшения массы образца, вводимого в колонку для получения линейного отклика преобразователя. Расчет распределения точек кипения нефтяных дистиллятов проводили по стандартной методике ASTM D 6352—04. Определены распределения углеводородных компонентов образца по площади, время их удерживания, температура разгонки

и величина ионного тока, способные провести идентификацию химического соединения.

Результаты и их обсуждение

Групповой углеводородный состав модельного образца гудрона, определенный адсорбционными методами, % мас.:

Масла 52,75
Смолы. 35,6
Асфальтены 3,45
Парафины. 2,2
Потери 6

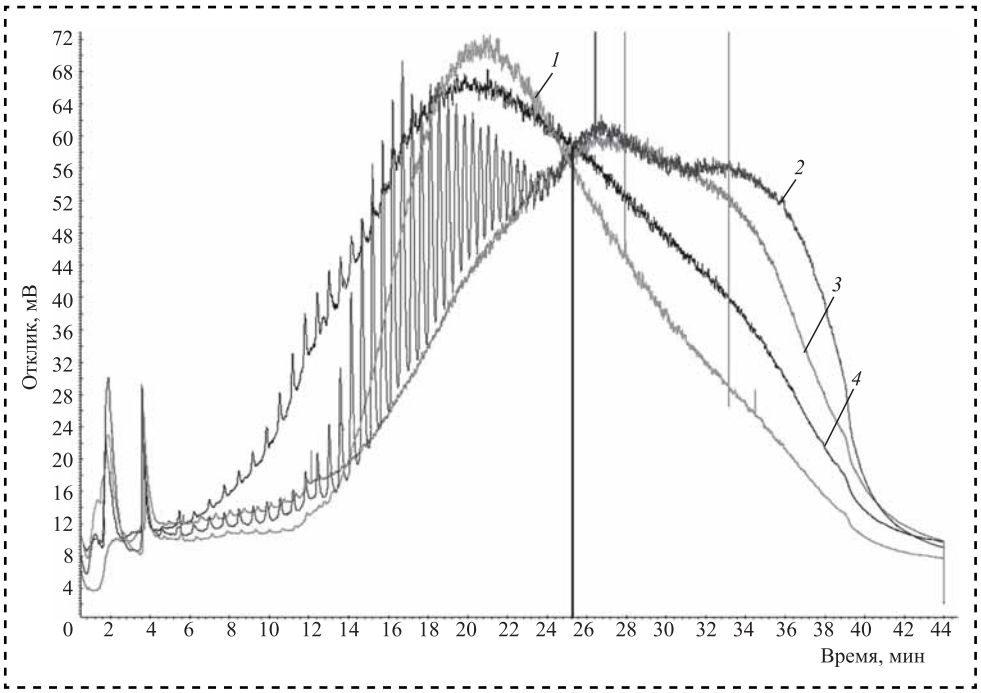
Для более наглядной тенденции изменения углеводородного состава на рисунке приведены кривые совмещенной хроматограммы: масел, смол, парафинов, гудрона. В таблице отражены параметры интегрирования, проводимого по стандартной методике с использованием возможностей прибора.

На приведенной хроматограмме видны несколько закономерностей:

— ход хроматограммы гудронов схож с ходом хроматограммы масляной фракции, что обусловлено ее преобладанием в структуре тяжелых

Параметры гудрона по данным хроматографического анализа

№ пика	Вещество	Время удерживания, мин	Площадь, мВ·мин	№ пика	Вещество	Время удерживания, мин	Площадь, мВ·мин
2	C14	1,9	4816,6	81	C70	28,93	7241,6
7	C16	3,4	281,8	85	C72	29,47	8300,5
13	C20	6,98	4480,9	88	C74	29,94	10451,0
15	C22	8,47	6862,1	90	C76	30,33	5963,2
17	C24	9,87	8641,0	93	C78	30,60	7481,3
19	C26	11,18	13917,4	96	C80	31,08	7580,5
21	C28	12,42	15915,1	97	C82	31,27	6535,1
24	C30	13,59	14322,1	100	C84	31,82	2897,3
27	C32	14,71	25841,5	102	C86	32,02	4226,3
29	C34	15,75	15021,3	103	C88	32,12	7667,8
34	C38	17,84	14150,9	105	C90	32,50	6182,7
41	C42	19,85	31082,2	108	C92	32,85	4954,3
44	C44	20,63	11386,6	111	C94	33,26	3644,6
47	C46	21,41	19521,6	113	C96	33,64	3246,2
50	C48	22,27	12892,9	116	C98	34,05	6837,8
53	C50	23,00	11035,7	117	C100	34,29	3931,2
56	C52	23,72	20274,2	119	C102	34,64	4001,1
59	C54	24,59	7181,5	121	C104	35,04	6771,6
61	C56	25,16	14604,9	122	C106	35,23	8852,0
63	C58	25,63	13193,5	124	C108	35,65	11766,7
65	C60	26,40	22581,9	126	C112	36,22	1717,3
68	C62	27,02	5986,7	129	C114	36,39	6828,4
72	C64	27,57	4817,6	131	C116	36,84	3584,5
75	C66	28,05	8023,6	132	C118	36,98	14055,6
78	C68	28,56	7175,6				



Хроматограммы фракций гудронов:
1 — масла; *2* — парафины; *3* — смолы; *4* — гудрон

остатков и большим вкладом углеводородных компонентов масел в объем гудрона;

— хроматограммы масел, смол, парафинов, гудрона пересекаются в одной точке, которая может служить характеристической для дальнейших изысканий;

— симбатный ход кривых парафинов и смол, начиная со времени удерживания 26 мин; в парафиновой части преобладают углеводороды состава С28—С38, характерные для газойлевой фракции парафинистой нефти, однако сама хроматограмма не типична для флюидов нефтей: из-за несовершенства стандартной методики разделения смесей по групповому составу, поскольку вместо монотонного убывания н-алканов с повышением температуры кипения флюида демонстрирует его рост.

При отделении парафиновых углеводородов от смол и асфальтенов стандартным методом по ГОСТ 11851—85 во многих случаях получается фракция, включающая значительные количества микрокристаллических парафинов с числом углеводородных атомов более 40, выпадающая совместно с асфальтенами и высокомолекулярными смолами [4—5]. Методом адсорбционной хроматографии на силикагеле затруднительно отделить масляную фракцию от нейтральных смол [4], поэтому смолистые вещества оказываются во фракции, подготовленной для отделения твердых парафинов (хроматограммы парафинов и смол на рисунке свидетельствуют об отсутствии их четкого разделения стандартным методом). Для определения содержания твердых парафинов существует метод хроматографического анализа, минимизирующий потери, возникающие при использовании селективных растворителей при осаждении асфальтенов и экстрагировании смол, основанный на хроматографировании исходного образца и того же образца с маркером с последующей математической обработкой полученных результатов [4]. Количественное определение состава нефтепродуктов методом хроматографического анализа дает завышенные результаты по сравнению со стандартным методом, что объясняется отсутствием потерь.

Исходя из экспериментальных данных, предложен экспресс-метод, состоящий в условном разделении области хроматограммы на две группы веществ: масла и смолы, содержание которых в структуре гудрона наибольшее. Левая часть хроматограммы соответствует маслам и некоторому количеству твердых парафинов, составляющих их структуру, правая — отнесена к смолам и асфальтенам (см. рисунок). Граница разделения в проведенном эксперименте проходит через точку пересечения кривых возгонки масел, смол и гудрона, отвечающей времени удерживания 25,63...25,80 мин (компоненты С56—С60, предпочтительно С58). По таблице стандартных температур кипения н-алканов находим, что данная точка соответствует 600...615 °С.

Кинетические закономерности процессов расщепления компонентов тяжелых остатков неодинаковы в различных областях температурного воздействия. При более низких температурах расходуются одни компоненты, а при более высоких — другие термически более стабильные, но с меньшими скоростями. В низкотемпературной области до 260 °С алкилбензолы, нафтено-ароматические углеводороды масляной фрак-

ции практически не разлагаются [5]. В высокотемпературной же области (свыше 400...500 °С) чувствительность к изменению температуры масел приблизительно в 1,5 раза выше, чем смол [6], что способствует росту концентрации и накоплению с течением времени смолистых веществ в системе [7] (на рисунке свыше 600...615 °С сохраняется высокая интенсивность высокомолекулярных компонентов (смолистые вещества) и пологость хода хроматограммы). Молекулярная масса смол колеблется от 700 до 1000 а.е.м. [8, 9], а число углеродных атомов в их соединениях доходит до 80...100, что полностью отвечает установленной границе в 58 атомов углерода.

Исходя из интегральных значений площади компонент, приходящихся на каждую из рассматриваемых областей, в условиях эксперимента определена концентрация масляной фракции в гудроне, равная 53,8 %. Эта цифра выше полученной стандартным методом, так как на долю потерь при проведении анализа адсорбционным методом приходилось 6 % вещества. На область рисунка, отвечающую смолистым веществам, еще приходится смесь неуглеводородных высокомолекулярных соединений типа асфальтенов с молекулярной массой от 1200 а.е.м. [3]. Исходя из предлагаемой концепции хроматографического анализа, с хорошей сходимостью со стандартным методом можно определить содержание масел, — наиболее ценного сырья для нефтепереработки.

Выводы

Данные метода газовой хроматографии указывают на компонентный состав смеси и термическую стойкость ее элементов, устанавливают зависимости глубины структурно-фазовых превращений масел, смол в зависимости от параметров термодеструктивных процессов, сопровождающих переработку сырья, продолжительности их протекания. С повышением экологических требований к защите окружающей среды метод газовой хроматографии более предпочтителен в сравнении со стандартными способами фракционного разделения смесей. Развитие методов химического анализа состава нефтепродуктов обеспечивает на различных этапах нефтепереработки мониторинг состава сырья и приготовление сложных смесей вида компаундированных масел, а также смазок на основе окисленных битумов.

Применение предлагаемого подхода к использованию хроматографического анализа повышает экспрессность полуколичественного метода определения группового состава в тяжелых нефтяных остатках, что важно при выборе технологических режимов установок производства битумных материалов, деасфальтизации гудронов с целью получения остаточных масел.

Библиографический список

1. **Интернет-ресурс.** URL: http://lukoil-neftekhim.ru/raznoe/neftepererabatyvayushhie-zavody-ssha-perspektivy-razvitiya.html.
2. **Козаков Л.П., Крейн С.Е.** Физико-химические основы производства масел. М.: Химия, 1978. 320 с.
3. **Гун Р.Б.** Нефтяные битумы. М.: Химия, 1973. 432 с.
4. **Иванова Л.В., Гордадзе Г.Н., Кошелев В.Н.** Определение массового содержания твердых парафинов в нефти методом капиллярной газожидкостной хроматографии // Труды института нефти и газа им. И.М. Губкина. 2011 (264). № 3. С. 61—68.
5. **Nguen X. Thanh, Hsieh M., Phip R.P.** Waxes and asphaltenes in crude oils // Organic Geochemistry. 1999. Vol. 30. P. 119—132.
6. **Колмаков Г.А.** Экологические и физико-химические аспекты процессов термической переработки кислых гудронов в дорожный битум: дис.... канд. техн. наук. Н. Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского. 2007. 27 с.
7. **Карпов Ю.О., Кривцов Е.Б., Головко А.К.** Влияние условий крекинга на состав продуктов высокосернистого вакуумного газойля // Фундаментальные исследования. 2014. № 9. С. 752—756.
8. **Нелюбов Д.В.** Разработка композиционных ингибиторов образования асфальтосмолопарафиновых отложений нефти на основе изучения их состава и адгезионных свойств: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень: Тюменский государственный университет. 2014. 152 с.
9. **Мусина Н.С.** Разработка способов определения элементного и углеводородного состава тяжелых нефтяных остатков: дис. ... канд. техн. наук. М.: Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН. 2014. 186 с.

УДК 621.501

М.Я. Израилович, *д-р техн. наук,* **Б.М. Эрлих,** *канд. техн. наук*
(ИМАШ им. А.А. Благонравова РАН)
E-mail: uliaerlich@mail.ru

Гашение фрикционных автоколебаний с учетом двух направлений колебаний инструмента

Рассмотрена задача об активном гашении автоколебаний инструмента, колеблющегося в двух направлениях.

The paper presents decision of problem of extinguishing of self oscillations of tool with bearing in mind of two directions of tool paths.

Ключевые слова: демпфирование колебаний, общие направления, два пути инструмента.

Keywords: damping of self oscillations, mutual directions, two paths of tool.

Обычно задачи исследования пассивного, а также активного гашения фрикционных автоколебаний механических систем различного назначения рассматривают в рамках модели с одной степенью свободы [1, 2]. Но при трении обрабатывающего инструмента с жидким смазочным материалом необходимо учитывать, по меньшей мере, две степени свободы [3—5]. Одно перемещение соответствует перемещению вдоль направляющих, второе — всплывание — имеет место вследствие действия гидродинамической подъемной силы.

В общем случае уравнение динамики такой автоколебательной системы записывают в виде [3—5]:

$$m\ddot{x} + \beta_x\dot{x} + c_x x - F_1(y) = 0; \quad (1)$$

$$m\ddot{y} + \beta_y\dot{y} + c_y y - F_2(\dot{x}) = 0, \quad (2)$$

где m — масса колеблющейся системы;

β_x, β_y — коэффициенты линейного демпфирования по горизонтальному и вертикальному направлениям;

c_x, c_y — линейные жесткости по горизонтальному и вертикальному направлениям;

$F_1(y)$ — нелинейная функция, отражающая эффект всплытия;

$F_2(\dot{x})$ — нелинейная функция автоколебательного типа, отражающая воздействие горизонтальной колебательной составляющей (уравнение 1) на вертикальную составляющую (уравнение 2).

Для численного эксперимента двумерных колебаний, описываемых уравнениями (1) и (2), предполагают, что

$$F_1(y) = \alpha_0 y + \alpha_1 y^2; \quad (3)$$

$$F_2(\dot{x}) = \beta_0 x - \beta_1 \dot{x}^3. \quad (4)$$

Численные значения расчетных параметров:

m = 1,0; β_x = 0,1; c_x = 1,0...3,0; β_y = 0,1; c_y = 3,0...9,0; α_0 = 1,0; α_1 = 0,5; β_0 = 1,0; β_1 = 0,5.

Двумерные колебания имеют высокую интенсивность и неустойчивый характер. По методам гашения квазигармонических автоколебаний [6] в правые части системы (1), (2) вводят не одно, а два виброгасящих воздействия специальной структуры u_1, u_2, обеспечивающих устойчивые колебания малой интенсивности.

При этом уравнения (1), (2) принимают вид:

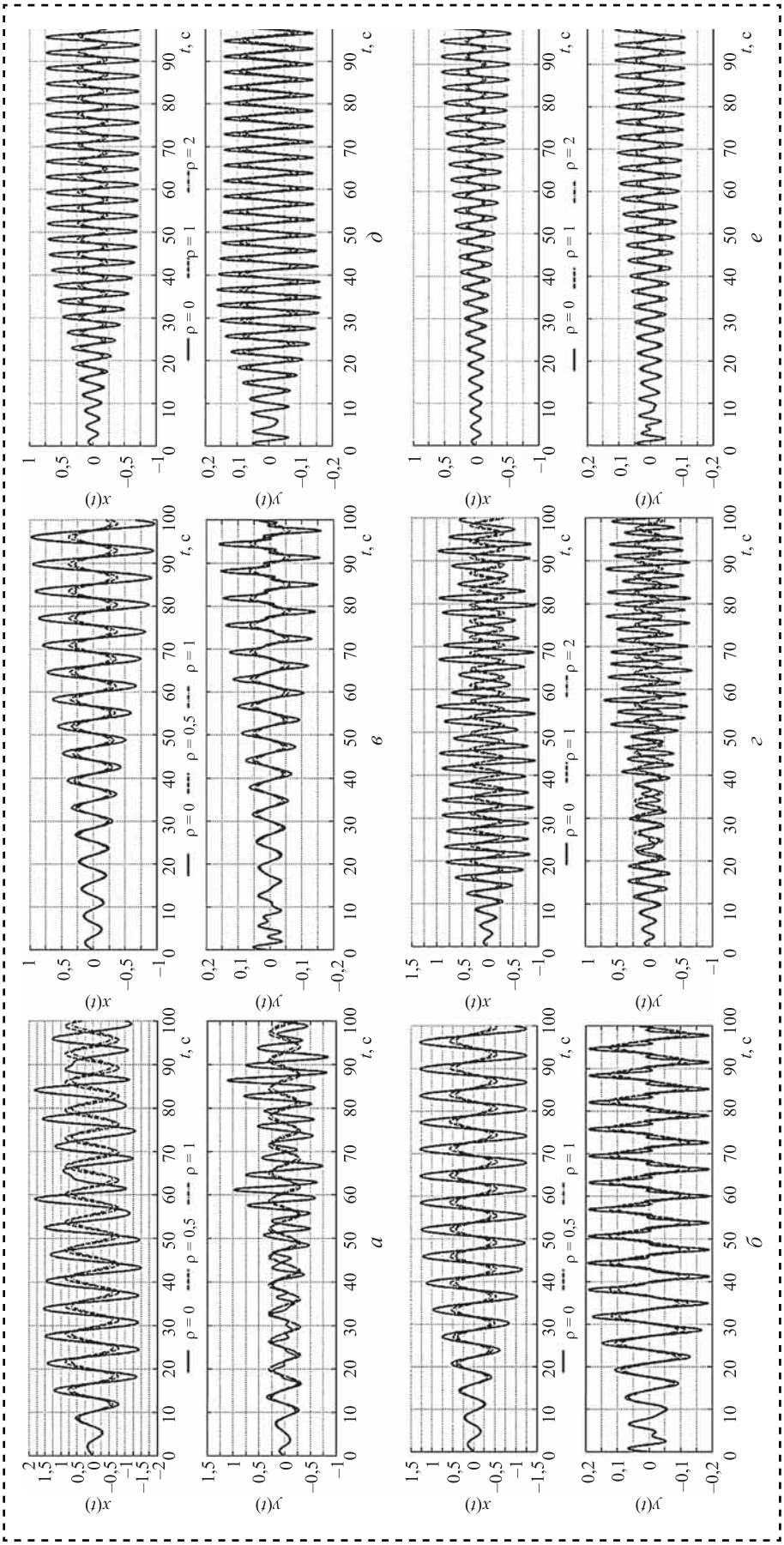
$$m\ddot{x} + \beta_x\dot{x} + c_x x - F_1(y) = u_1; \quad (5)$$

$$m\ddot{y} + \beta_y y + c_y y - F_2(\dot{x}) = u_2. \quad (6)$$

Для системы (5), (6) найдены два наиболее эффективных варианта силового гашения:

$$\left\{\begin{array}{l} u_1 = -\rho\left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2\right)\dot{x} \\ u_2 = -\rho\left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2\right)\dot{y} \end{array}\right\}; \quad (7)$$

$$\left\{\begin{array}{l} u_1 = -\rho\left(x^2 + y^2\right)\dot{x} \\ u_2 = -\rho\left(x^2 + y^2\right)\dot{y} \end{array}\right\}. \quad (8)$$



Графическое решение уравнений (5) и (6) при условии (7) силового гашения:
а — $c_x = 1$, $c_y = 3$; *б* — $c_x = 1$, $c_y = 5$; *в* — $c_x = 1$, $c_y = 7$; *г* — $c_x = 3$, $c_y = 5$; *д* — $c_x = 3$, $c_y = 7$; *е* — $c_x = 3$, $c_y = 9$

При $\rho = 0$ — отсутствует гашение, $\rho > 0$ — активное гашение.

На рисунке представлены графики решения системы (5), (6) при условии (7) силового гашения. Результаты решения системы (5), (6) для силового гашения (8) очень близки к результатам решения (7) и в статье не приводятся.

Вывод

Показано, что при трении обрабатывающего инструмента с жидким смазочным материалом при определенных параметрах системы могут иметь место интенсивные автоколебания одновременно в двух направлениях — вдоль направляющих и перпендикулярно им. Для активного гашения таких колебаний предложены две действующие активные виброгасящие силы с обратной связью, уменьшающие амплитуду автоколебаний в обоих направлениях.

Библиографический список

1. **Крагельский И.В., Гитис Н.В.** Фрикционные автоколебания. М.: Наука, 1987. 183 с.
2. **Израилович М.Я., Эрлих Б.М.** Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. М.: Спутник, 2015. 38 с.
3. **Кудинов В.А., Лисицын Н.М.** Основные факторы, влияющие на равномерность перемещения столов и суппортов станков при смешанном трении // Станки и инструмент. 1962. № 2.
4. **Кудинов В.А., Воробьева Т.С.** Испытание станков общего назначения на виброустойчивость при резании // Станки и инструмент. 1962. № 8.
5. **Кудинов В.А.** Динамическая характеристика резания // Станки и инструмент. 1963. № 10.
6. **Израилович М.Я.** Синтез систем возбуждения квазигармонических автоколебаний. М.: URSS, 2011. 122 с.
7. **Израилович М.Я.** Активное виброгашение вынужденных квазигармонических колебаний нелинейных систем. М.: URSS, 2010. 170 с.

УДК 620.16

С.В. Портнов, *канд. техн. наук*, **Л.В. Подкользина,** *канд. пед. наук*, **С.Н. Яковлев,** *канд. техн. наук*
(Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого)
E-mail: Stannik59@mail.ru

Основные виды износа современных конструкционных полиуретанов

Приведено описание основных видов износа полиуретана в контакте с абразивной поверхностью, имитирующей шероховатость цементно-бетонного покрытия пола. Представлена эмпирическая зависимость по определению интенсивности изнашивания полиуретана в режиме скольжения по нормализованной абразивной поверхности.

Description of main type of polyurethane wear in contact with abrasive surface simulated concrete surface undulation is given. Empirical dependence for definition of polyurethane wear rate in sliding mode over normalized abrasive surface is presented.

Ключевые слова: абразивный износ, усталостный износ, износ посредством скатывания, режим скольжения, интенсивность изнашивания.

Keywords: abrasive wear, fatigue wear, wear under rolling, sliding mode, wear rate.

В современном машиностроении актуален вопрос замены традиционного эластомера — резины на более совершенный современный материал — полиуретан с целью улучшения конструктивных, технологических и эксплуатационных качеств деталей. Перспективность полиуретанов для современной промышленности обусловлена тем, что их свойства существенно дополняют возможности использования других эластомеров, каучуков, резин и пр.

По своим конструкционным и технологическим возможностям полиуретаны — наиболее

универсальный полимерный материал. Полиуретан характеризуется высокими физико-механическими свойствами, имеет большой диапазон твердости, эластичности, низкую истираемость, высокую прочность, высокое сопротивление раздиру, маслобензостойкость, кислотостойкость и рабочий температурный интервал −35...75 °С [1—3].

Полиуретан как конструкционный материал, применяется для изготовления деталей машин, работающих главным образом на деформацию сжатия и сдвига. При работе на изгиб или кручение полиуретановые детали отличаются высокой эластичностью и практически не могут нести нагрузку.

В зависимости от вида нагружения выделим две основные группы деталей машин из полиуретана:

1) упругие детали, испытывающие воздействие статических и разовых ударных нагрузок:

— прокладки и уплотнения;

— универсальные шарниры в рычажных системах;

— упругие буферы — ограничители перемещений;

2) упругие и износостойкие детали, испытывающие воздействие динамических нагрузок:

— валы для полиграфии и целлюлозно-бумажного производства;

— массивные шины, опорные колеса, бегунки;

— амортизаторы.

Виды износа и его интенсивность рассмотрим на примере деталей вращения с упругим полиуретановым покрытием (массивные шины, опорные колеса и т.д.) в контакте с абразивной поверхностью, имитирующей шероховатость цементно-бетонного покрытия пола.

При трении полиуретана по абразивной поверхности интенсивность истирания наиболее существенно зависит от геометрии истирающей поверхности.

Выделяют три основных вида изнашивания эластомеров при контакте с твердым основанием [4]:

1) абразивный износ под воздействием острых вершин шероховатостей основания;

2) усталостный износ под воздействием скругленных вершин шероховатостей основания;

3) скатывание и отрыв роликоподобных частиц с поверхности эластомера в контакте с относительно гладким основанием.

Абразивный износ

Абразивный износ происходит при условии, что истирающая абразивная поверхность твердая и обладает острыми режущими гранями, истираемый полиуретан также относительно жесткий. Механизм абразивного изнашивания одноактный.

Внешним проявлением абразивного износа является наличие продольных полос пропахивания на поверхности полиуретана твердостью 95 ShA, при этом частицы изнашивания представляют собой продольные полоски, свернутые произвольным образом (рис. 1). Силы молекулярного и механического сцепления растягивают поверхность эластомера в направлении движения острого выступа до тех пор, пока сила трения не превысит упругую восстанавливающую силу, после чего смещенный слой материала отрывается от массива и процесс повторяется.

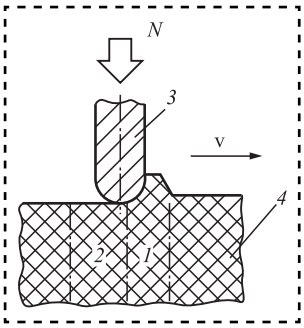


Рис. 1. Механизм образования продольных полос пропахивания для полиуретанов твердостью 90...95 ShA:
1 — зона сжатия; *2* — зона растяжения; *3* — абразив; *4* — полиуретан; *N* — нормальная сила; v — скорость контртела

Абразивное изнашивание протекает достаточно интенсивно. Оно характерно для высоко нагруженных колес (массивных шин, контактирующих с шероховатым основанием — бетоном, асфальтом) и реализуется в случае буксования, движении "юзом" и при макропроскальзывании рулевого колеса штабелера-погрузчика.

Для полиуретана твердостью 90 ShA характерна смешанная картина изнашивания, которая включает в себя продольные полосы пропахивания и поперечные скатки. В зависимости от свойств материала и силы трения при одном или нескольких проходах проявляются надрывы поверхностного слоя (рис. 2). Кривые на рисунке первоначально представляли собой прямые линии, нанесенные на равном расстоянии на поверхность полимера под прямым углом к направлению движения. Искажение линий указывает на неравномерное распределение напряжения вокруг скользящего выступа. Концентрация напряжений максимальна непосредственно перед выступом, но разрывов эластомера нет, так как сила трения прижимает полимер к поверхности выступа. Разрыв полимера происходит в момент его отрыва от выступа, перпендикулярно направлению максимального напряжения (пока-

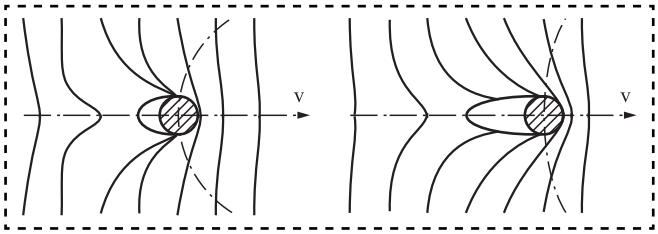


Рис. 2. Механизм образования поперечных скаток

занно штриховой линий). После прохождения выступа эластомер релаксирует и часть поверхности полимера вблизи разрыва, поворачивая почти на 90°, образует поперечные полосы. Из-за силы трения в зоне образовавшегося раздира полиуретан сворачивается в скатку, и через несколько проходов образовавшаяся скатка отделяется от основного материала.

В зависимости от свойств материала и сил трения при одном или нескольких проходах появляются надрывы поверхностного слоя. На поверхности полимера образуются поперечные полосы — "рисунок Шалломаха". При этом частицы изнашивания представляют собой скатки диаметром 0,5...1 мм и длиной 5...10 мм. Меньшие размеры свойственны для более твердых полиуретанов (рис. 3).

Для изучения процесса изнашивания полиуретана в условиях трения скольжения спроектирована и изготовлена экспериментальная установка, в которой в качестве нагружающего устройства использован рычаг с местом для крепления кронштейна. Полиуретановый образец закрепляется в кронштейне при помощи цангового зажима (рис. 4).

Нормальная нагрузка N, действующая на образец, равна нагружающему моменту, деленному на плечо (160 мм). Нагружающий момент состоит из: трех постоянных и одной переменной частей. Постоянными являются массы рычага, кронштейна и подвеса; переменной — масса на подвесе.

Для минимизации погрешности нагружения экспериментально определили центр тяжести рычага в сборе с одним кронштейном, а затем с другим. Эти данные о рычажной системе использованы для расчета тарировочных постоянных и для построения тарировочных диаграмм, устанавливающих соответствие между весом груза, помещенного на подвес, и нагрузкой, приложенной к образцу. При отсутствии грузов на подвесе нормальная нагрузка, действующая на образец, N = 60 Н. Она распределяется по номинальной

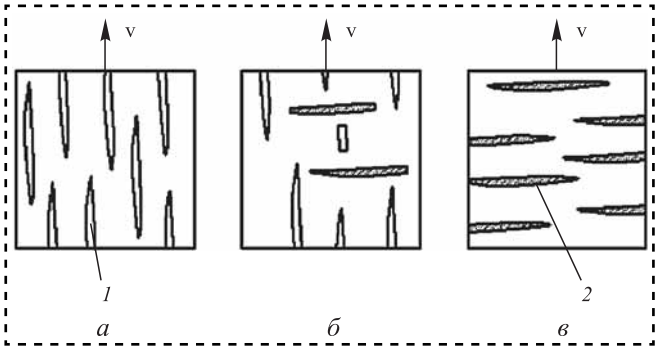


Рис. 3. Повреждение поверхности изнашивания полиуретановых образцов различной твердости:
а — 95 ShA; *б* — 90 ShA; *в* — 85 ShA; *1* — канавка; *2* — скатка

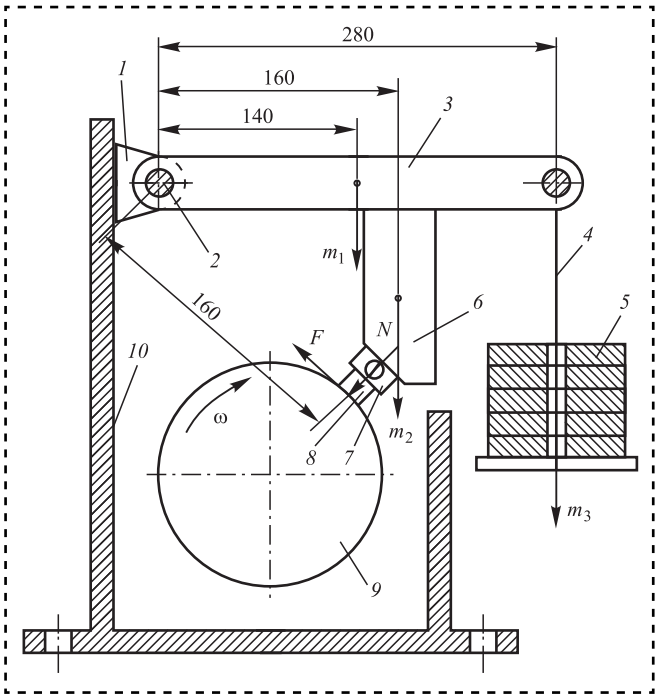


Рис. 4. Схема нагружения образца:
1 — проушина; *2* — ось; *3* — рычаг; *4* — подвес; *5* — груз; *6* — кронштейн; *7* — цанга; *8* — образец; *9* — барабан; *10* — корпус

площади контакта $S_н$, очерченной габаритными размерами барабана и испытуемого образца.

Полиуретановые образцы изготавливали в виде цилиндра диаметром 20 мм и высотой H = 12 мм. Половина высоты используется для зажима в цанге, а вторая — непосредственно для истирания по абразивной поверхности (рис. 5).

Номинальную площадь контакта $S_н$ определяют следующим образом:

$$S_н = 2\pi \int_{\sqrt{R^2-r^2}}^{R} \sqrt{1+y'^2}\, y dx =$$

$$= 2\pi \int_{\sqrt{R^2-r^2}}^{R} \sqrt{1+\frac{x^2}{R^2+r^2}}\sqrt{R^2+r^2}\, dx =$$

$$= 2\pi R \int_{\sqrt{R^2-r^2}}^{R} dx = 2\pi R\left(R-\sqrt{R^2-r^2}\right).$$

При R = 73 мм и r = 10 мм $S_н$ = 315 мм^2.

При отсутствии грузов на подвесе в соответствии с тарировочной диаграммой нормальное давление составляет $p = \frac{N}{S_н} \approx 0,2$ МПа. Для получения p = 0,4 МПа на подвесе необходимо поместить груз массой 4,3 кг, для p = 0,6 МПа — 8 кг и т.д.

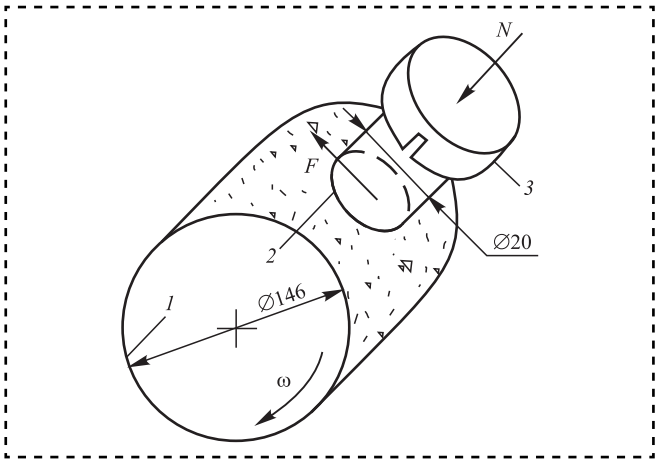


Рис. 5. Определение номинальной площади контакта:
1 — барабан; *2* — образец; *3* — цанга

Получена зависимость линейной интенсивности износа I_h от нормального давления p во фрикционном контакте и скорости скольжения для полиуретанов различной твердости:

$$I_h = \left[10 + 40p^{1,55} + 60\left(\mathrm{v}_{\text{ск}} - 0,2\right)\left(1 + \frac{95\mathrm{ShA}}{26}\right)\right]10^{-6},$$

где p — нормальное давление, МПа;
v — скорость скольжения, м/с;
ShA — твердость полиуретана по Шору.

Соответственно толщина истертого слоя h равна:

$$h = I_h L,$$

где I_h — линейная интенсивность износа;
L — путь трения, мм.

Усталостный износ

При наличии закругленных вершин выступов абразивной поверхности разрушение полиуретана происходит по усталостному механизму в результате действия повторных сжимающих, растягивающих и сдвиговых напряжений на его поверхности.

Этот вид износа не приводит к образованию на изношенной поверхности царапин. Полиуретановая поверхность в процессе истирания становится шероховатой, при этом выступы и впадины на ней располагаются беспорядочно, не образуя какого-либо определенного рисунка (рис. 6).

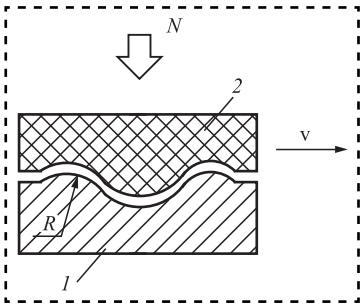


Рис. 6. Деформация поверхности полиуретана под действием скругленных вершин абразивной поверхности:
1 — абразив; *2* — полиуретан; *N* — нормальная сила; v — скорость контртела

По мнению В.Л. Попова [5] в реально работающих узлах трения преобладает износ, связанный с усталостным разрушением поверхностного слоя, при этом интенсивность усталостного изнашивания на несколько порядков меньше абразивного изнашивания.

Износ полиуретана посредством скатывания

Новый, специфический для высокоэластичных материалов вид фрикционного износа — истирание посредством скатывания, истирание полимеров в условиях трения по относительно гладким поверхностям (по наливным полимерным полам складских и производственных помещений).

Истирание посредством скатывания реализуется при высоком значении коэффициента трения между полимером и истирающей поверхностью (износ полиуретанового обода массивных шин погрузчиков и штабелеров).

Для понимания механизма данного вида изнашивания рассмотрим взаимодействие некоторого выступа на поверхности полимера с поверхностью контртела, прижатого к выступу нормальной силой N и перемещающегося параллельно поверхности полимера со скоростью v (рис. 7). Если трение между выступом полимера и истирающей поверхностью достаточно велико, то на первой стадии

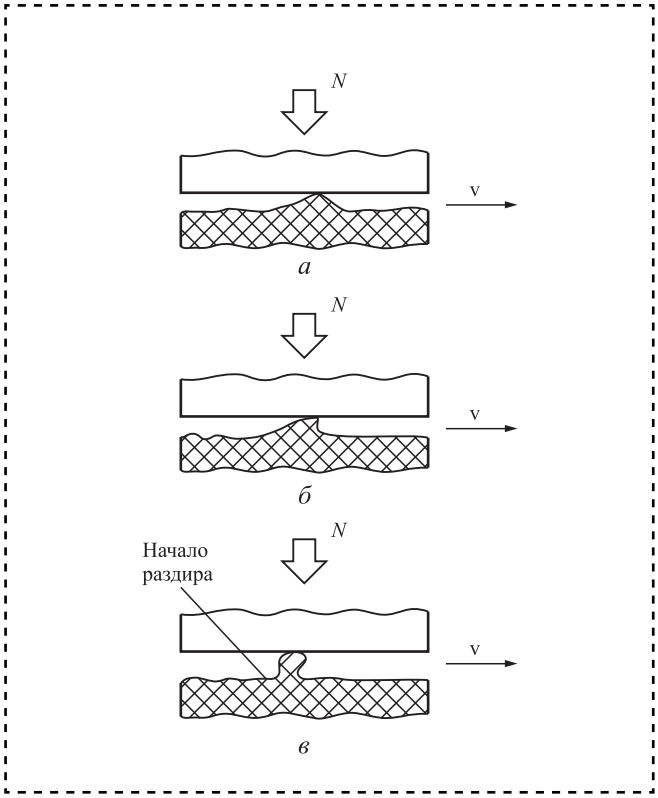


Рис. 7. Схема истирания полимера посредством скатывания:
N — нормальная сила; v — скорость контртела

движение контртела вызовет сложную деформацию выступа. При сложнонапряженном состоянии полимера разрушение начнется с возникновения трещины там, где поверхностные слои материала находятся в состоянии наибольшего растяжения. Если трещина возникла, дальнейший ее рост происходит под действием небольшой силы.

Рост трещин приведет к отделению частей полимера от его поверхностного слоя. Немедленный отрыв, однако, маловероятен. Вероятнее постепенное разрывание полимера, при котором тонкий слой будет сворачиваться в скатку.

При таком механизме изнашивания дальнейшее движение происходит в условиях трения качения, сопровождаемого непрерывным разрыванием полимера и сворачиванием отделяющегося лоскута в скатку. Разрыв лоскута приводит к отделению скатки и тем самым завершается элементарный акт фрикционного износа. Такой характер истирания вероятен для полимеров с малым сопротивлением разрыву.

При эксплуатации массивных шин с полиуретановым ободом имеет место комбинация всех трех механизмов износа, и трудно выделить вклад каждого из них.

Выводы

Интенсивность изнашивания от нормального давления имеет показательную зависимость, так как с увеличением давления контактирующие поверхности сближаются и фактическая площадь контакта увеличивается.

С увеличением скорости скольжения интенсивность изнашивания возрастает линейно. Увеличение изнашивания связано с разогревом поверхностного слоя и уменьшением прочности полиуретана.

С уменьшением твердости полиуретана интенсивность изнашивания увеличивается, так как меняется механизм изнашивания. У более мягких полиуретанов механизм изнашивания в виде скаток более интенсивный, чем у твердых полиуретанов.

Библиографический список

1. **Huibo Zhang.** Synthesis and Characterization of Polyurethane Elastomers // Journal of Elastomers and Plastics. 2008. N 40. P. 161—177.

2. **Яковлев С.Н.** Проектирование и основы технологии деталей машин из полиуретана. СПб.: Реноме, 2013. 176 с.

3. **Modesti M.** Processing of Ternary Polymer Blends Based on Polyvinyl Chloride, Thermoplastic Polyester Polyurethane and Polyethylene-Co-Acrylate-Co-Co. Part II: Physical and Mechanical Properties // Journal of Elastomers and Plastics. 2000. N 32. P. 15—32.

4. **Ante Agic.** Kinetic Parameters Estimation for Thermal Degradation of Polyurethane Elastomers // Journal of Elastomers and Plastics. 2006. № 38. P. 105—118.

5. **Попов В.Л.** Механика контактного взаимодействия и физика трения. М.: Физматлит, 2013. 485 с.

УДК 621.656.13

Е.А. Дубовик, В.Б. Мищиненко
(Ростовский государственный университет путей сообщений)
E-mail: dubovik1982@list.ru

Определение нормативов срока службы восстановленных моторных масел в двигателях внутреннего сгорания машин

Рассмотрены варианты расчетного определения срока службы моторных масел в двигателе внутреннего сгорания машин.

Considered versions of calculation determination of service life of engine oils in an Internal combustion engine.

Ключевые слова: анализ, критерий, моторное масло, двигатель.

Keywords: analysis, criteria, motor oil, engine.

Каждое новое поколение масел приобретает более высокие антиокислительные, противоизносные и многие другие положительные свойства и более длительное время стабильно их сохраняют. Пример тому — полусинтетические и синтетические масла. Моторные масла — про-

дукт довольно дорогой, ресурс их очень небольшой, что удорожает эксплуатацию двигателей внутреннего сгорания (ДВС).

Увеличение ресурса возможно достичь добавлением в масло присадок и поддержанием их стабильной концентрации в процессе эксплуатации ДВС; совершенствованием конструктивных элементов ДВС, что позволяет снизить "напряженность" работы масла в системе смазки; очисткой и регенерацией масла. Нормативный ресурс восстановленного масла определяют экспериментальными методами, но поскольку восстанавливают его, как правило, небольшими порциями, эксперименты придется повторять бесконечно. Поэтому необходимо использование расчетных методов.

Н. Розен предлагает определять время работы масла $T_м$ в ДВС, основываясь на содержании серы в горючем:

$$T_м = \frac{k_1 V_н}{k_2 S_T},$$

где S_T — расход сгораемой серы в ДВС, кг/ч;

$V_н$ — масса первоначально заливаемого моторного масла в ДВС, кг;

k_1, k_2 — эмпирические константы.

Н.Г. Пучков и В.Д. Резников полагают, что за фактор работоспособности моторного масла можно принять следующую зависимость:

$$t_м = \frac{x_0 \left(V_н - B_р\right) m_а K_G G_г S_T}{32 K_с K_п},$$

где $t_м$ — время работы моторного масла в двигателе, ч;

x_0 — щелочное число свежего моторного масла;

$B_р$ — часовой расход масла на угар, кг/ч;

$m_а$ — атомная масса металла присадки, а.е.м.;

K_G — доля газов, прорывающихся в картер;

$G_г$ — масса газа, кг;

$K_с$, $K_п$ — коэффициенты соответственно совместимости и полноты использования присадок.

Основываясь на скорости изнашивания, U. Kening предлагает определять оптимальное время работы моторного масла $t_м$, ч, по формуле:

$$t_м = \frac{T_и K_м \sqrt{T_и} K_t \sqrt{K_t}}{\sqrt{И_0 / K_н K_E}},$$

где $K_м$ — константа масла;

$T_и$ — время, за которое происходит максимальный износ ДВС, ч;

K_t — показатель, зависящий от времени работы моторного масла;

$K_н$ — коэффициенты неполноты сгорания и K_E — механической напряженности;

$И_0$ — скорость изнашивания.

Е.С. Кузнецов предлагает технико-экономический фактор, который включает затраты на ремонт и техническое обслуживание:

$$t_м = \frac{З_д}{П_д} + \frac{З_з}{П_з} + \frac{З_р}{П_р},$$

где $З_д$, $З_з$, $З_р$ — затраты, соответственно, на долив и замену моторного масла, текущий ремонт агрегатов, руб.;

$П_д$, $П_з$, $П_р$ — соответственно, периодичность долива и замены, межремонтный ресурс, ч.

Все эти параметры по приемам прогнозирования ресурса моторных масел не позволяют управлять ресурсом моторного масла на стадии его разработки и конструирования ДВС, а лишь рассматривают вопрос о процессе и скорости старения моторного масла.

Все эти зависимости требуют обязательных предварительных испытаний моторных масел в конкретных марках ДВС для определения многочисленных коэффициентов. Кроме того, они рассматривают процесс старения моторного масла односторонне, либо со стороны работы ДВС, либо со стороны моторного масла.

Наиболее теоретически и экспериментально обоснованным фактором маслонапряженности, разработанным в России, является фактор "жесткости" работы моторного масла, предложенный С.Г. Арабяном и усовершенствованный В.В. Салминым [1], который с использованием поправочных коэффициентов, учитывающих особенности работы ДВС с внешним и внутренним смесеобразованием (коэффициент неполноты сгорания $K_н$ и коэффициента механической напряженности K_E), имеет вид:

$$A = \frac{G_г}{Fzn}\left(\frac{N_e}{G_м}\right) K_\alpha K_\beta K_н K_E K_п K_т K_S,$$

где $G_г$ — часовой расход горючего при нормальной максимальной мощности ДВС, кг/ч;

F — площадь поверхности масляной пленки, воспринимающей теплоту в одном цилиндре, м^2;

n — частота вращения;

Z — число цилиндров ДВС;

N_e — эффективная номинальная (максимальная) мощность двигателя, кВт;

$G_м$ — вместимость масляного картера, кг;

K_α, K_β, $K_п$, K_S, $K_т$ — коэффициенты, учитывающие соответственно жесткость работы моторного масла в ДВС с турбонаддувом; степень охлаждения ДВС; периодичность замены моторного масла в ДВС; содержание серы в горючем; техническое состояние ДВС.

Наибольшее влияние на критерий "жесткости" работы моторного масла "А" оказывает эффективная мощность, емкость масляного картера и степень сжатия ДВС.

Регрессионное уравнение, определяющее функциональную связь между фактором "жесткости" работы моторного масла и показателями ДВС, имеет вид:

$$A = 0,328E^{1,28}G_м^{-1,19}N_e^{1,47},$$

где E — степень сжатия двигателя;

N_e — эффективная номинальная (максимальная) мощность двигателя, кВт;

$G_м$ — вместимость масляного картера, кг.

Данный критерий оценивает только уровень маслонапряженности работы моторного масла в ДВС и не учитывает физико-химические и эксплуатационные свойства моторного масла, которое планируется применять в том или ином ДВС.

Показателями, оказывающими влияние на величину эксплуатационных свойств моторного масла являются: индекс вязкости (учитывающий их вязкостно-температурные свойства); моющие свойства по ПЗВ (учитывающие интенсивность нагаро- и лакообразования на поверхности поршня при работе моторного масла в ДВС); щелочное число (учитывающее наличие присадок в моторных маслах и скорость процессов старения моторного масла в ДВС).

На основании выбранных параметров и положений теории подобия составлен безразмерный фактор для оценки уровня эксплуатационных свойств моторного масла, который получил название фактор работоспособности моторного масла C:

$$C = \frac{\text{РН} \cdot \text{ИВ}}{PZV} K_д,$$

где РН — щелочное число не работавшего в ДВС моторного масла, мгКОН/г;

ИВ — индекс вязкости не работавшего в ДВС моторного масла;

PZV — моющие свойства не работавшего в ДВС моторного масла по ПЗВ, баллы;

$K_д$ — коэффициент, учитывающий тип двигателя (для бензиновых — 0,6; для дизельных — 1).

Коэффициент соответствия представляет собой зависимость фактора работоспособности от фактора "жесткости" и имеет вид:

$$C' = 43,561A^{0,476}.$$

Таким образом, установлена возможность и варианты решения вопроса срока работы моторного масла в двигателе.

За норматив срока службы восстановленного моторного масла предлагается принять время достижения предельного значения фактора качества CQ [5].

Показателем качества при определении времени достижения предельного значения является содержание нерастворимых осадков, характеризующее степень срабатывания присадки.

Срок службы восстановленного моторного масла в ДВС определяют согласно следующей методике:

1. Задают предельное значение фактора качества CQ. Для моторного масла в первом приближении можно принять $CQ = 1,5$.

2. Определяют начальные значения показателей качества.

3. Определяют коэффициенты в уравнениях скорости изменения содержания нерастворимых осадков:

$$K_{но} = \frac{a}{x_{но}}$$

и щелочного числа:

$$K_{щч} = ax_{щч}^2,$$

где a — маслонапряженность.

4. Определяют время работы восстановленного моторного масла в двигателе:

$$t_{см} = f\left(CQ_{пр}\right);$$

$$CQ_{пр} = \frac{x_{но i}}{x_{щч} + 2};$$

$$t_{но i} = f\left(x_{но i}, x_{но 0}\right);$$

$$t_{щч i} = f\left(x_{щч 0}, x_{щч i}\right);$$

$$t_{см} = t_{но i} = t_{щч i},$$

где $t_{см}$ — наработка на необходимую замену моторного масла;

$CQ_{пр}$ — предельное значение комплексного показателя качества;

$x_{но i}$ — концентрация нерастворимого осадка в масле на момент замены;

$x_{щч i}$ — щелочное число на момент замены масла;

$t_{но i}$ — наработка на момент достижения концентрации $x_{но i}$;

$t_{щч i}$ — наработка на момент достижения концентрации $x_{щч i}$.

Восстановленные моторные масла, как правило, обладают лучшими, чем свежие масла, трибологическими свойствами, что снижает износ узлов трения и механизмов. Это в свою очередь сохраняет простои машин, затраты на их ремонт и техническое обслуживание. Использование восстановленных масел — экономически выгодно, особенно с точки зрения экологии.

Библиографический список

1. **Салмин В.В.** Способ подбора моторных масел к автотракторным двигателям // Двигателестроение. 2003. № 2. С. 48—50.
2. **Стребков С.В.** Применение горючего, смазочных материалов и технических жидкостей в агропромышленном комплексе: учеб. пособие. Белгород: ГСХА, 1999. 168 с.
3. **Смирнов В.Г.** Повышение долговечности автомобильных деталей за счет совершенствования конструкций смазки. М.: НИИНавтопром, 1980. 349 с.
4. **Венцель С.В.** Смазка двигателей внутреннего сгорания. М.: Машгиз, 1963. 253 с.
5. **Годунова Л.Н.** Обоснование нормативов срока службы восстановленных моторных масел в тракторных двигателях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Зерноград: Азово-Черноморский инженерный институт, 2005. 24 с.

Читайте в следующем номере:

Вайцехович С.М., Панов Д.В., Лебедев А.Н., Скрыльникова А.Г. Водо-водяные подогреватели с использованием спирально-профильных труб для индивидуальных тепловых продуктов

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. Привод управления заслонкой водометного движителя плавающей машины

Руднева Л.Ю. Повышение эксплуатационных характеристик высокоточных агрегатов и приборов, основанное на технологии сборки по принципу равножесткости

Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Свойства задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал — втулка"

Гоцеридзе Р.М., Уразаев З.Ф. Технологический микроклимат сборочных цехов

Памяти

Фёдора Михайловича МИТЕНКОВА

(25.11.1924—09.11.2016)

С глубоким прискорбием сообщаем, что 9 ноября 2016 г. на 92-м году жизни скончался Фёдор Михайлович Митенков — выдающийся ученый, разработчик и создатель ядерных энергетических установок гражданского и военного назначения, внесший значительный вклад в обороноспособность и энергетическую безопасность России, академик РАН, Герой Социалистического труда, лауреат Ленинской и Государственных премий СССР и Российской Федерации, Почетный член Европейского Ядерного общества, лауреат Международной энергетической премии "Глобальная энергия", Почетный гражданин Нижнего Новгорода, советник по научным вопросам директора АО "ОКБМ Африкантов".

Фёдор Михайлович Митенков родился 25 ноября 1924 г. в селе Ключи Саратовской области. В 1941 г. Фёдор Митенков с отличием окончил среднюю школу и поступил в Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского. С 1942 по 1946 гг. — служба в армии, участник Великой Отечественной войны.

По окончании обучения Ф.М. Митенков был направлен в г. Горький на Артиллерийский завод им. Сталина в Особое конструкторское бюро (ОКБ), где он прошел путь от инженера-расчетчика до директора и Генерального конструктора ОКБМ (1969—1997 гг.).

Известный ученый, заслуженный деятель науки и техники РФ, автор более 300 публикаций и докладов и более 40 изобретений, руководитель работ в области атомного энергетического машиностроения Ф.М. Митенков внес значительный вклад в разработку и создание ядерных реакторов для атомных ледоколов, реакторных установок для подводных лодок и кораблей ВМФ, а также реакторов на быстрых нейтронах.

Академик Ф.М. Митенков награжден дважды орденом Ленина, орденом Трудового Красного знамени, Орденом Октябрьской революции, медалью "За победу над Германией в Великой Отечественной войне" и другими наградами.

Фёдор Михайлович войдет в историю как один из выдающихся деятелей атомной науки и техники и организаторов производства.

Добрая память о Фёдоре Михайловиче Митенкове навсегда сохранится в наших сердцах.

Редакция и редакционный совет нашего журнала выражают глубокие соболезнования родным и близким Фёдора Михайловича Митенкова

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 11.10.2016. Подписано в печать 21.11.2016. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.