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

3 2015 (176)

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Житников Б.Ю., Житников Ю.З. Предельная скорость ударного взаимодействия плоских губок схвата с плоскостью обработанной детали 3

Современные технологии сборки

Березин С.Я., Кулеш И.М. Исследование коэффициентов трения при ультразвуковой сборке резьбовых пар с крепежно-резьбообразующими деталями 6

Чадеев В.М., Аристова Н.И. Управление автоматизацией дискретного производства 11

Технологическая оснастка для сборки

Иванов А.А. Инструментальная оснастка сборочного модуля для соединения деталей в узел 19

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бохоров И.О., Карабанов В.В. Пайка крупных массивных конструкций (*продолжение*) 23

Вытнов Ю.В., Александрин А.Г., Голубев С.В., Герасимов Е.А., Медведев Н.П. Применение сплава МНА № 6 в качестве альтернативы при автоматической аргонодуговой наплавке направляющих и трущихся поверхностей деталей насосного оборудования для атомных реакторов на быстрых нейтронах 28

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В. Обеспечение требуемого качества торцовых поверхностей колец подшипников шлифованием 31

Шишкарев М.П., Угленко А.Ю. Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием 36

В помощь конструктору, технологу

Ямников А.С., Ямникова О.А., Кашмин О.С. Эмпирические зависимости величины сближения контактирующих деталей при импульсной нагрузке 42

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

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

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД

Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОМНА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

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

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф.

ТОЛЬЯТТИ

А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

ТУЛА

В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТРАЖИНСКИЙ, д.т.н.

ПОЛЬША

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2015

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

3 2015 (176)

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Zhitnikov B.Yu., Zhitnikov Yu.Z. Speed limit of shock interaction of flat sponges of a skhvat with the plane of the processed detail 3

Modern technologies in assembly

Berezin S.Ya., Kulesh I.M. Researches of friction at ultrasonic assembly of thread units with self-tapping parts 6

Chadeev V.M., Aristova N.I. Management automation of discrete production 11

Technological equipment for assembly

Ivanov A.A. The tooling of the assembly module to link parts into a unit 19

Assembly welding works. Soldering

Bokhorov I.O., Karabanov V.V. Soldering large massive structures (*continued*) 23

Vytnov Yu.V., Aleksandrin A.G., Golubev S.V., Gerasimov E.A., Medvedev N.P. Application of the MNA No. 6 alloy as an alternative for the machine argon-arc overlaying welding of guide and friction surfaces of nuclear fast reactor pump equipment parts 28

Quality assurance. Testing. Monitoring

Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V. Providing the required quality of end surfaces bearing rings grinding 31

Shishkarev M.P., Uglenko A.Yu. Analysis of options for adaptive friction clutchwith separate power circuit 36

Industrial and design engineer's aid

Yamnikov A.S., Yamnikova O.A., Kashmin O.S. Empirical dependence of convergence, wetted parts with impulse load 42

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.: (499) 269-54-98. Fax: (499) 269-48-97.
http://www. mashin.ru E-mail: sborka@machin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

KOLOMNA
Yu.D. AMIROV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR
B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTIUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

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

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

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

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOLIATI
A.I. RYZHKOV

TULA
A.I. PREYS

KHABAROVSK
V.A. LASHKO

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

POLAND
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKI

Executive editors of current issue:
Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

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

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

УДК 621.757

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

Предельная скорость ударного взаимодействия плоских губок схвата с плоскостью обработанной детали

Получена математическая зависимость предельной скорости ударного взаимодействия плоских губок схвата робота-манипулятора с плоскостью окончательно обработанной детали.

Mathematical dependence of speed limit of shock interaction of flat sponges of a skhvat of the robot-manipulator with the plane of finally processed detail is received.

Ключевые слова: удар, упругопластическая деформация, предельная скорость удара.

Keywords: blow, elasto-plastic deformation, speed limit of blow.

Пусть плоские губки пневматического схвата захватывают за окончательно обработанные плоские поверхности детали. Найдем предельную скорость поступательного движения губок, при которой на взаимодействующих поверхностях детали и губок возникли бы упругопластические деформации в заданном диапазоне.

Воспользуемся теоремой об изменении главного вектора количества движения механической системы в интегральной форме [1]:

$$\bar{K}_1 - \bar{K}_0 = \sum \bar{S}e\Delta t, \qquad (1)$$

где $\bar{K}_0$ и K_1 — соответственно векторы количества движения системы до и после взаимодействия;

$\sum \bar{S}e$ — суммарный вектор импульса внешних сил;

Δt — время взаимодействия.

Для случая удара, когда учитывают только силу удара в проекции на ось, направленную по направлению движения, выражение запишется как

$$m\mathrm{v}_1 - m\mathrm{v}_0 = -F^{\text{уд}}\Delta t, \qquad (2)$$

где m — приведенная масса подвижных элементов схвата к губке;

v_1 и v_0 — соответственно конечная и начальная скорость движения губок при ударе;

$F^{\text{уд}}$ — сила удара.

С учетом того, что в конце удара скорость движения губок равна нулю, выражение (2) примет вид:

$$m\mathrm{v}_0 = F^{\text{уд}}\Delta t. \qquad (3)$$

В выражении (3) не известны сила и время удара.

Воспользуемся утверждением [2], при котором считаем, что работа силы удара и работа силы при медленном сжатии взаимодействующих поверхностей деталей равны при одинаковой деформации поверхностей:

$$A^{\text{уд}} = A^{\text{сж}}_{\text{уд}} + A^{\text{сж}}_{\text{пл}}, \qquad (4)$$

где $A^{\text{уд}}$ — работа силы удара;

$A^{\text{сж}}_{\text{уд}}$ — работа силы при упругом сжатии взаимодействующих поверхностей;

$A^{\text{сж}}_{\text{пл}}$ — работа силы при пластическом сжатии.

Работа силы удара при поступательном движении губок согласно работе [1] равна

$$A^{\text{уд}} = F^{\text{уд}}h^{\text{уд}}, \qquad (5)$$

где $h^{\text{уд}}$ — перемещение губок при деформации взаимодействующих поверхностей.

Считаем, что в процессе удара губки движутся равнозамедленно, следовательно, можно записать:

$$h^{\text{уд}}\text{v}_{\text{ср}}\Delta t = \frac{\text{v}_1 + \text{v}_0}{2}\Delta t = \frac{\text{v}_0}{2}\Delta t, \qquad (6)$$

где $\text{v}_{\text{ср}}$ — средняя скорость движения губок при ударе.

Найдем работу, совершаемую силой, при упругопластической деформации сжимаемых поверхностей. Следует обратить внимание, что на взаимодействующих поверхностях деталей возникают напряжения смятия:

$$A_{\text{уп}}^{\text{см}} + A_{\text{пл}}^{\text{см}} = P\left(h_{\text{уп}} + h_{\text{пл}}\right), \qquad (7)$$

где P — сила, под действием которой происходит упругопластическая деформация поверхностей при медленном сжатии губками детали;

$h_{\text{уп}}$ — упругая деформация поверхностей;

$h_{\text{пл}}$ — пластическая деформация поверхностей согласно формуле Герца:

$$h_{\text{пл}} = \frac{P - P_0}{2\pi R\text{НД}}, \qquad (8)$$

где $P_0 = P_{\text{см}}$ — сила, под действием которой происходит упругая деформация поверхностей;

R — приведенный радиус кривизны взаимодействующих поверхностей;

НД — пластическая твердость материалов.

Согласно [4, 5] пластическая твердость запишется:

$$\text{НД} = \frac{900\,000}{130 - \text{HRC}}\ \text{кг/см}^2, \qquad (9)$$

где HRC — твердость материалов по Роквеллу.

Силу, под действием которой происходит упругая деформация поверхностей, находят из выражения допустимых напряжений материалов деталей на смятие [7]:

$$\sigma_{\text{см}} = \frac{F_{\text{см}}}{S_{\text{см}}} \leqslant \left[\sigma_{\text{см}}\right], \qquad (10)$$

где $\sigma_{\text{см}}$ и $[\sigma_{\text{см}}]$ — действительное и предельное напряжения материала детали на смятие;

$F_{\text{см}}$ — сила смятия поверхностей;

$S_{\text{см}}$ — площадь смятия.

Учитывая, что в технической литературе отсутствует математическое выражение полуоси пятна контакта при медленном взаимодействии плоских поверхностей, введем приближение. Так как взаимодействующие поверхности губки и детали имеют неплоскостность, будем считать, что контакт происходит либо по выпуклым, либо по вогнутым сферическим или циклическим поверхностям.

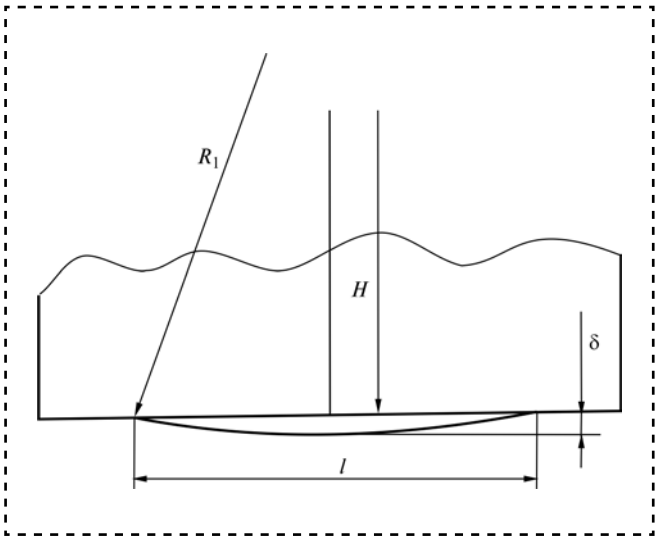


Рис. 1. Неплоскостность губки схвата

Найдем радиусы взаимодействия условно сферических поверхностей (рис. 1).

Предельные отклонения от плоскости δ с учетом интервала номинальных длин l выбираем по ГОСТу.

Согласно геометрии, с учетом отклонения от плоскости, радиусы кривизны находят из соотношения:

$$R_1^2 = \frac{l^2}{2^2} + H^2 = \frac{l^2}{4} + \left(R - \delta\right)^2.$$

Отсюда

$$R_1 = \frac{l^2}{2\delta} + \frac{\delta}{2}. \qquad (11)$$

Так, для случая, когда $\delta = 4$ мкм, а $l = 20$ мм

$$R_1 = R_2 \approx 12{,}5 \text{ м}.$$

Площадь взаимодействия поверхностей

$$S = \pi a^2, \qquad (12)$$

где a — длина полуоси пятна контакта взаимодействия поверхностей, которую согласно работам [4, 5] находят из выражения:

$$a = 1{,}109\sqrt[3]{\frac{P_0 R_1 R_2}{E\left(R_1 \pm R_2\right)}}, \qquad (13)$$

где P_0 — сила, под действием которой происходит упругая деформация поверхностей;

$R_1 = R_2$ — радиусы взаимодействующих сфер;

E — приведенный модуль упругости материалов деталей. Знак ± учитывает взаимодействие выпуклых поверхностей сфер.

Найдем длину полуоси пятна контакта с учетом выражений:

$$a = \frac{1{,}109^3 \left[\sigma_{см}\right] \pi R_1 R_2}{E\left(R_1 + R_2\right)}.$$

Глубину упругой деформации поверхностей $\alpha_у = h_{уп}$ найдем из геометрии их взаимодействия (рис. 2):

$$R_1^2 = a^2 + \left(R_1 - \alpha_у\right)^2.$$

Окончательно:

$$\alpha_у = R_1 - \sqrt{R_1^2 - a^2}.$$

Введем приближение. Считаем, что при пластической деформации $h_{пл}$ одной из поверхностей в одну треть от допуска на охватываемый размер деталь будет оставаться годной, поэтому:

$$h_{пл} = 2\frac{1}{3}\Delta,$$

где Δ — допустимое отклонение охватываемого размера детали.

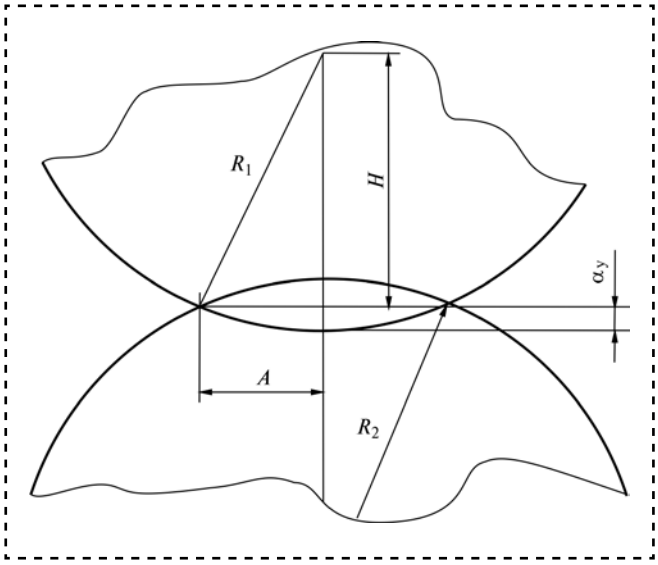


Рис. 2. Определение полуоси пятна контакта

Найдем из выражения (8) силу P и с учетом выражений (9), (10), (12) подставим в выражение (3) равенства работ при ударе и медленном сжатии губками детали. Получим:

$$F^D \frac{v_0}{2}\Delta t = \left(\left[\delta_{см}\right]\pi a^2 + 2\pi R_{пр}\frac{900\,000}{130 - \mathrm{HRC}}\frac{2}{3}\Delta\right)\times$$
$$\times\left[\left(R_1 - \sqrt{R_1^2 - a^2}\right) + \frac{2}{3}\Delta\right].$$

Из последнего выражения выделим правую часть выражения (2) и подставим в него. После преобразований получим предельную скорость движения губок схвата, при которой при ударе на окончательно обработанной поверхности детали возникает пластическая деформация, не превышающая трети от допуска на диаметральный размер:

$$v_0 < \sqrt{2\left(\left[\delta_{см}\right]\pi a^2 + 2\pi R_{пр}\frac{900\,000}{130 - \mathrm{HRC}}\frac{2}{3}\Delta\right)\times \left[\left(R_1 - \sqrt{R_1^2 - a^2}\right) + \frac{2}{3}\Delta\right]}.$$

Экспериментальная проверка глубины пластической дезорганизации на окончательно обработанной поверхности детали показала удовлетворительное совпадение с заданным значением.

Библиографический список

1. **Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р.** Курс теоретической механики. В 2-х т. Т. 2. М.: Наука, 1979. 543 с.

2. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для машиностроительных вузов / Ю.З. Житников и др. Под общ. ред. Ю.З. Житникова. Ковров: КГТА, 2008. 616 с.

3. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Описание процесса ударной затяжки резьбовых соединений с учетом потерь энергии при ударе на упругопластические деформации взаимодействующих поверхностей // Вестник Рыбинского государственного авиационного технического университета имени П.А. Соловьева. 2014. № 1 (28). С. 97—100.

4. **Житникова И.В.** Обоснование момента сопротивления в резьбе при ударной затяжке резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 10. С. 41—44.

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

6. **Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидекин Ю.И.** Инженерные работы упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

7. **Иосилевич Г.Б., Строганов Г.Б., Шарловский Ю.В.** Затяжка и стопорение резьбовых соединений. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1985. 244 с.

8. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. М.: Наука, 1970. 595 с.

УДК 621.88:621.891

С.Я. Березин, *д-р техн. наук,* **И.М. Кулеш**
(Забайкальский государственный университет)
E-mail: kulesh.irina22@yandex.ru

Исследование коэффициентов трения при ультразвуковой сборке резьбовых пар с крепежно-резьбообразующими деталями

Представлены результаты экспериментальных исследований коэффициентов трения в резьбовых парах, собираемых путем ввинчивания резьбовыдавливающих винтов в гладкие отверстия с наложением ультразвуковых колебаний. Описаны конструкции исследовательской оснастки, приведены экспериментальные зависимости коэффициентов трения от основных влияющих факторов.

Experiment results of friction coefficients are presented in screw joints assembled by a way of a screwing up the self-forming bolts in smooth holes with effect of ultrasonic oscillations. Designs of research equipment are described, experimental dependences of friction coefficients on the major influencing factors are given.

Ключевые слова: резьба, образец, коэффициент трения, скольжение, ультразвук, колебания давления, сила, радиальный натяг, соединение, динамометр, тензометрия.

Keywords: thread, sample, friction coefficient, sliding, ultrasonic, oscillations of pressure, strength, radial tightness, joint, dynamometer, tensometry.

Энергия ультразвука используется во многих технологических операциях, включая сборку тугих резьбовых соединений, при которой процесс связан со значительными силами трения, изменяющимися определенным образом в условиях ультразвуковых колебаний. Однако информации по исследованию показателей фрикционного взаимодействия в ультразвуковом скользящем резьбовом контакте в условиях значительных радиальных натягов недостаточно.

Известен ряд работ, посвященных экспериментальным исследованиям коэффициентов трения в тугих резьбовых соединениях [1, 2], но в настоящее время они представляют интерес только по материальной части исследований.

Известны теоретические работы, в которых описаны математические модели параметров трения в процессах, связанных с работой деформации при наличии акустических ультразвуковых полей [3, 4]. Установлены механизмы воздействия ультразвуковых колебаний (УЗК) на контактное трение, обусловленные изменением кинематики скольжения на контактной поверхности, характером взаимодействия контактируемых поверхностей и эффективностью действия смазок.

Взаимодействие пульсирующих поверхностей сопровождается трением между микронеровностями, в результате чего выделяется тепло. Нагрев микровыступов приводит к уменьшению напряжений, необходимых для их смятия или сдвига. Степень повышения температуры микровыступов зависит от амплитуды смещений, частоты колебаний и шероховатости инструмента.

Ультразвуковые колебания могут также активизировать химические реакции на контактных поверхностях, увеличивать проникающую способность смазок и создавать кавитационные полосы в акустических полях среды смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Знакопеременный характер давлений в таких плоскостях приводит к образованию кавитационных пузырьков и их схлопыванию, что создает ударные гидродинамические волны с давлением до 100 МПа [5]. Интенсивные акустические течения улучшают смазывающе-проникающую способность СОЖ и снижают силы трения. Указанные возможности ультразвука позволяют надеяться на положительный

эффект при различных технологических процессах, в том числе и при сборке резьбовых соединений с резьбообразующими крепежными деталями, при условии установления реальной картины их фрикционного взаимодействия.

Существующие гипотетические и теоретические данные требуют экспериментального подтверждения каких-либо установленных тенденций в законах изменения фрикционных показателей. Поэтому авторами была реализована серия экспериментов по исследованию коэффициентов трения в резьбовом соединении, образуемом завинчиванием в гладкие отверстия специальных резьбовыдавливающих винтов. Для этого случая был разработан и изготовлен комплекс динамометрических устройств, позволяющий измерять радиальные усилия в тугой резьбе, и соответствующий этим усилиям крутящий момент.

Тензометрический динамометр крутящего момента (рис. 1 на стр. 2 обложки) устанавливается на столе сверлильного станка. Его гильзовый упругий элемент с тензодатчиками установлен на основании и закрыт цилиндрическим кожухом *1*. На верхний фланец гильзы *4* крепится магнитострикционный преобразователь *3*, размещаемый внутри гильзы, которая одновременно является и резервуаром водоохлаждения. На верхнем конце концентратора закреплен фланец *2* для установки на нем различных приспособлений. В верхний и нижний фланцы гильзы вкручены штуцеры для шлангов *5* водоохлаждения. Провода от тензодатчиков выведены на контактную колодку *6*, а провода магнтострикционного преобразователя выведены через отверстие верхнего фланца гильзы с резиновым уплотнением. В нашем случае на фланец *2* крепится тензометрический динамометр радиальных усилий, конструкция которого представлена на рис. 2 на стр. 2 обложки.

Динамометр радиальных усилий (рис. 2) представляет собой жесткую конструкцию ящичного типа, включая корпус *3* с нижним фланцем *13*, который стыкуется с ответным фланцем волновода магнитострикционного преобразователя. К внутренним продольным сторонам корпуса привинчены направляющие *4*, по которым свободно перемещается каретка *5* на шарикоподшипниках *6*.

В верхней части каретки выполнен квадратный паз для установки в него разрезного образца *1* с отверстием под резьбу. Образец прижат к стенке каретки винтом *2*, который передает усилие сжатия половинок образца на каретку, упор *7* и двухопорную балку *8* на упругий элемент *9*, установленный на двух ножевых опорах *10*.

Упругий элемент представляет собой стальную закаленную шлифованную тензобалку размером 10×25×140 мм. На ее свободной поверхности наклеены тензодатчики *11*, выводы от которых подведены к разъему *12*. В ненагруженном состоянии (без образца *1*) тензобалка фиксируется от падения плоскими пружинами, которые не показаны на схеме, но видны на рис. 2, *а*.

Последовательность подготовки динамометрического комплекса включает следующие действия:

1) после закладки половинок образца *1* в паз каретки *5* их сжимают винтом *2* некоторым усилием для выборки зазоров и люфтов с системе;

2) балансируют каналы обоих динамометров;

3) в патрон устанавливают винт и на стенки отверстия и резьбу винта наносят смазку ЦИАТИМ-221;

4) включают систему водоохлаждения, а затем ультразвуковой генератор;

5) включают станок и завинчивают специальный винт в гладкое отверстие разрезного образца. Винты для экспериментов имеют закаленные заходные части. Общий вид образцов и винтов приведен на рис. 3 на стр. 2 обложки;

6) при завинчивании винта в разрезной образец производится одновременная запись осциллограмм крутящего момента и радиальных усилий, причем обрабатывается только фрагмент записи после выхода из отверстия заходной части винта. Это необходимо для того, чтобы исключить влияние деформационной составляющей крутящего момента;

7) в конце завинчивания производят реверс шпинделя, винт вывинчивается из отверстия, станок останавливают и выключают ультразвук.

Далее обрабатывают осциллограммы и рассчитывают соответствующие коэффициенты трения.

Образцы с отверстиями под резьбу изготавливали из сплавов АК7ч, МЛ5 и конструкционной стали 20. Винты имели метрическую резьбу диаметром 10...12 мм с мелким шагом 1,0...1,25 мм. Для сборки и исследований применяли ультразвуковой генератор ИЛ-10 компании ИНЛАБ с выходной мощностью до 2000 Вт с параметрами ультразвука по частоте — 24 кГц и амплитуде — 5...20 мкм.

В работе [4] теоретически установлена зависимость коэффициента трения в виде ряда Маклорена

$$\bar{f}(A) = f_0 - \frac{\alpha}{2} A\left(\pi - \frac{\pi^3}{3!} - \frac{\pi^5}{5!} - \frac{\pi^7}{7!} - \ldots\right), \quad (1)$$

где $\bar{f}(A)$ — динамический коэффициент трения от влияния амплитуды колебаний;

f_0 — коэффициент трения при обычном процессе;

α — константа;

A — амплитуда ультразвуковых колебаний.

Из формулы видно, что с ростом амплитуды колебаний коэффициент трения должен уменьшаться. Доказано также, что с ростом частоты коэффициент снижается, но в меньшей степени, чем от влияния амплитуды. В действительности влияние параметров ультразвука может иметь иной характер, поэтому в статье представляются результаты экспериментов по исследованию динамических коэффициентов трения.

Предварительно рассмотрим некоторые расчеты, необходимые для обработки данных, снятых с динамометра радиальных усилий. Для этого рассмотрим отверстие разрезного образца в координатах XOY (рис. 4). Возьмем только одну половину отверстия и определим давления, действующие в резьбовом контакте радиально σ_R, и давления, формирующие продольное усилие разжатия половинок образца σ_{max}. Упругая тензобалка динамометра регистрирует усилие от давления σ_{max}, а коэффициент трения формируется давлением σ_R, поэтому необходимо установить функциональную связь между данными величинами.

Радиальные давления σ_R распределены на площади полуцилиндра F_0, а давления σ_{max} действуют на площади F_r, равной $2rh$, где h — высота образца. Вычисления произведены

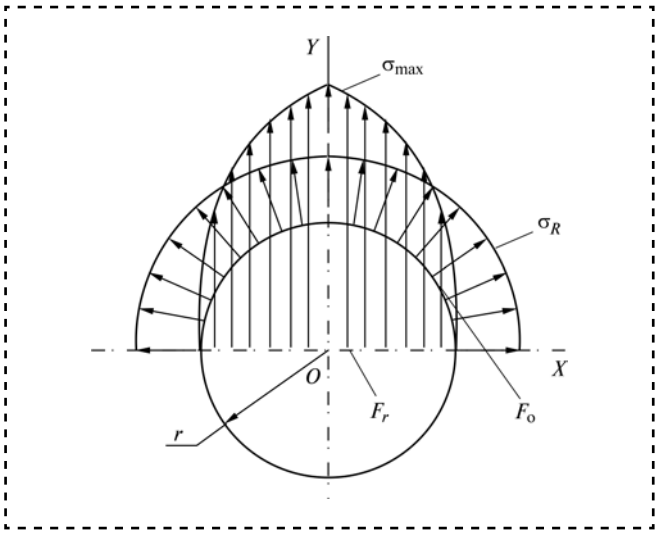


Рис. 4. Распределение радиальных давлений в резьбовом контакте на половине разрезного образца

исходя из условия равенства площадей эпюр обоих давлений.

Эпюра давлений σ_{max} ограничена параболой вида $y = -ax^2 + c$, а площадь эпюры будет равна

$$S_1 = \int_{-r}^{+r} \left(c + ax^2\right) | \, dx, \quad (2)$$

где $\pm r$ — координаты полюсов параболы или радиус отверстия, $r = \sqrt{-\frac{c}{a}}$;

c и a — коэффициенты квадратичной функции, $a = -\frac{\sigma_{max}}{r^2}$ и $c = \sigma_{max}$.

Решение уравнения (2) дает значение площади, равное

$$S_1 = \frac{8}{3}\sigma_{max} r.$$

Приравняем площадь S_1 к площади эпюры радиальных давлений $S_2 = \sigma_r \pi r$ и решим равенство относительно σ_r

$$\sigma_r = \frac{8}{3\pi}\sigma_{max}.$$

Определим момент трения в резьбе, который регистрирует динамометр крутящего момента, в виде

$$M_{тр} = \sigma_r f \frac{\pi r^2}{2} h.$$

Эта величина после преобразований будет окончательно иметь форму

Результаты экспериментальных исследований коэффициентов трения

Материал образца	Экспериментальная формула	Коэффициент трения скольжения		Снижение, %
		без ультразвука	с ультразвуком, v = 0,07 м/с, A = 10...12 мкм	
Сталь 20	$f = 0{,}183 - 0{,}388\text{v} - 0{,}01\text{A} - 0{,}04\text{v}^2 + 0{,}000226A^2 + 0{,}023A\text{v}$	0,123...0,14	0,088...0,093	30...34
МЛ5	$f = 0{,}115 + 0{,}09\text{v} - 0{,}008A - 0{,}1\text{v}^2 + 0{,}00025A^2 + 0{,}0061A\text{v}$	0,10...0,13	0,065...0,072	35...45
АК7ч	$f = 0{,}195 - 0{,}288\text{v} - 0{,}012A - 0{,}046\text{v}^2 + 0{,}0004A^2 + 0{,}018A\text{v}$	0,13...0,16	0,095...0,106	27...34

$$M_{\text{тр}} = \frac{8}{3\pi}\frac{Q_{\text{рег}}}{P} f F_{\text{в}} \frac{d_2}{2}, \qquad (3)$$

где d — диаметр отверстия;

$Q_{\text{рег}}$ — значение осевой силы, регистрируемое тензобалкой динамометра;

P — шаг резьбы;

f — коэффициент трения;

$F_{\text{в}}$ — площадь резьбового контакта по одному витку резьбы;

d_2 — средний диаметр резьбы.

Выражение (3) служит расчетной формулой для определения экспериментальных значений коэффициентов трения.

После серии сборок образцов из различных материалов получены экспериментальные зависимости коэффициентов трения от скорости завинчивания и амплитуды колебаний, которые приведены в таблице. Частота колебаний генератора ИЛ-10 была фиксированной, поэтому не использовалась в качестве определяющего фактора в зависимостях.

В результате обработки данных установлено, что введение ультразвука в зону фрикционного резьбового контакта положительно сказывается на снижении значений коэффициента трения и, соответственно, приводит к уменьшению крутящих моментов на посадочной части винтов. Однако характер поведения характеристик коэффициента неоднозначен. Кривые зависимостей коэффициента f от амплитуды ультразвука и скорости завинчивания для стальных разрезных образцов показаны на рис. 5, *а* на стр. 2 обложки. Можно видеть, что с увеличением скорости скольжения степень нелинейности кривой увеличивается в области максимальных значений амплитуд и в районе значений A = 12...17 мкм наблюдается некоторый минимум. Это связано, скорее всего, с тем, что резьбовые витки в тугом соединении находятся в стесненных условиях и в контакте не может наблюдаться каких-либо явлений отрыва поверхностей, а при росте амплитуды колебаний начинает в большей степени проявляться защемляющий эффект, который может увеличиваться с повышением температуры контакта. В целом, с ростом скоростей значения коэффициента трения также снижаются по нелинейному закону.

Кривые экспериментальных зависимостей коэффициентов трения в резьбовом контакте с образцами из магниевого сплава МЛ5 представлены на рис. 5, б на стр. 2 обложки. В этом случае проявляется еще более высокая степень нелинейности от значений амплитуды колебаний. Как видно из графиков, значения коэффициентов достаточно низкие, что связано с применением эффективной смазки с антиокислительными присадками.

Влияние скорости скольжения достаточно высоко, поэтому необходимо рекомендовать такие ее значения, которые обеспечивали бы высокую производительность и низкие значения коэффициентов. Этот диапазон соответствует области 0,08...0,10 м/с. Необходимо помнить, что в формируемом резьбовом контакте кроме трения скольжения работает еще и трение формообазования при работе деформирующей части заходного витка винта.

В данной статье не представлены данные по деформационному трению, но следует отметить, что с ростом скорости выше 0,1 м/с растет и величина контактных напряжений на деформирующей грани витка, поэтому повы-

шение скоростей выше указанных значений может привести к отрицательному эффекту.

Повышать амплитуду выше значений 10...12 мкм не имеет смысла не только с точки зрения обратного роста коэффициента трения, но и потому, что растет нагрузка на выходные цепи генератора. Кроме того, имеются и другие пути повышения эффективности акустического воздействия на процессы резьбообразования и трения.

Выводы

1. *Теоретическая зависимость (1) коэффициента трения не учитывает явной связи нелинейного характера со значениями амплитуды колебаний и скорости скольжения в резьбовой паре. Акустическое воздействие на резьбовой контакт приводит к снижению коэффициентов трения. Характер снижения явно нелинеен и неоднозначен и зависит от вида материала и его физико-механических свойств.*

2. *Значения коэффициентов трения снижаются с ростом скорости скольжения в исследованной области. Рекомендуемые значения скоростей находятся в пределах* $v = 0{,}08...0{,}10$ *м/с.*

3. *С повышением прочностных характеристик материала детали с отверстием нелинейность кривых коэффициентов трения начинает повышаться с ростом скорости скольжения в области верхних значений амплитуд.*

4. *Зависимости коэффициентов трения от амплитуды колебаний формируются в виде подающих характеристик с минимумами в области 15 мкм. Повышать амплитуду выше данных значений нет смысла, поэтому рекомендуемой областью может считаться диапазон 10...12 мкм.*

Библиографический список

1. **Захаров С.Н.** О значении коэффициента трения в тугих резьбовых соединениях // Вестник машиностроения. № 10. 1963. С. 24—26.
2. **Надежность** самоконтрящегося крепежа форсированных двигателей / Ю.С. Булыгин и др. // Тракторы и сельхозмашины. 1988. № 12. С. 33—35.
3. **Северденко В.П., Степаненко А.В., Заяш И.А.** Влияние ультразвука на контактное трение при прокатке / Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов: Сб. науч. тр. М.: 1970. Вып. 60. С. 275—280.
4. **Березин С.Я., Леонов В.Н., Кулеш И.М.** Динамические особенности процесса трения в ультразвуковом резьбовом контакте // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 1—3. С. 528—532.
5. **Кулемин А.В.** Физическая модель ультразвукового воздействия на процессы в металлах и сплавах в твердом состоянии // Тез. докл. 5-й Всесоюзной науч.-техн. конф. по ультразвуковым методам интенсификации технологических производств. М.: МИСИС, 1983. С. 4—5.

ООО "Издательство 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, Стромынский пер., д. 4,
Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98, факс: (499) 269-48-97
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

УДК 681.3.338

В.М. Чадеев, *д-р техн. наук,* **Н.И. Аристова,** *канд. техн. наук*
(Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН)
E-mail: avtprom@yandex.ru

Управление автоматизацией дискретного производства

Изложена общая концепция управления автоматизацией дискретного производства. Приведен алгоритм определения оптимального вектора автоматизации, минимизирующего стоимость единицы рабочего времени изготавливаемого робота. Приведен алгоритм для вычисления эффективности автоматизации. Рассмотрен алгоритм выбора схемы автоматизации при использовании нескольких видов роботов.

Set out the overall framework for managing the automation of discrete production. The algorithm of determination of the optimal vector automation, minimizing the cost per unit working time of the manufactured robot. The algorithm to calculate the efficiency of automation. The algorithm selection schemes automation using several types of robots.

Ключевые слова: автоматизация, дискретное производство, стоимость единицы рабочего времени робота, узел, технологическая операция, вероятность брака, автоматизация сборки, автоматизация технологической операции.

Keywords: automation, discrete manufacturing, cost per unit working time of the robot, node, process operation, probability of marriage, build automation, automation of technological operations.

Введение

Автоматизация производства — единственный гуманный (без ужесточения эксплуатации человека) способ увеличения производительности труда человечества. Можно выделить две области, автоматизируемые в настоящее время в промышленности: автоматизация организации производства (логистика и т.п.) и автоматизация технологических операций. Далее будет рассмотрена только проблема автоматизации технологических процессов.

Задача управления автоматизацией технологических процессов состоит в таком распределении работ между людьми и автоматами, которое привело бы к повышению производительности труда. Проблема в том, что автомат может быть таким дорогим (для его создания было затрачено много человеческих ресурсов), что он не окупится за время своей жизни. Задачу автоматизации производства можно определить как задачу распределения человеческих ресурсов между собственно производством и производством автоматов для автоматизации производства.

В экономике различают два вида производств: производство предметов потребления и производство средств производства. Автоматизация этих видов производства существенно различается. Дело в том, что при автоматизации производства средств производства возникает обратная связь: изготовленные на таком производстве роботы используют на этом же производстве. Наличие такой обратной связи оказывает влияние как на выбор оптимальной схемы автоматизации, так и на стоимость изготавливаемого робота.

При производстве предметов потребления схема автоматизации определяется характеристиками робота по выполнению технологических операций и стоимостью его рабочего времени.

При производстве средств производства схема автоматизации также определяется характеристиками робота по выполнению технологических операций и стоимостью единицы его рабочего времени. Но в результате автоматизации стоимость единицы его рабочего времени меняется! И этот эффект нужно учитывать.

Уровни автоматизации

Задача автоматизации производства может решаться на разных уровнях, например:

1) автоматизация отдельной технологической операции, что широко применяется при изготовлении массовой продукции — метизов, крепежа, конфет, микросхем и т.п.;

2) автоматизации некоторого технологического процесса, например, по изготовлению мобильных телефонов;

3) на уровне завода в целом. Актуальной является проблема создания единого интегрированного информационного пространства предприятия, объединяющего данные, начиная от уровня технологических процессов (АСУТП), через уровень оперативного управления производством (MES) и до верхнего уровня управления предприятием (ERP-системы) [1];

4) на уровне отрасли. На современном этапе развития производства многие предприятия имеют разветвленную территориально удаленную структуру. Это могут быть крупные холдинги, включающие несколько заводов, например, в области нефтепереработки ("Роснефть", "Газпром" и т.д.). Для предприятий такого уровня актуальной является возможность передачи информации в единый центр управления, интеграция множества автоматизированных систем управления от разных производителей в единый информационный центр. Для реализации данных задач используют современные информационные технологии, например, облачные решения, Internet, спутниковую связь и т.д.;

5) на уровне предприятий различных отраслей. Предлагаются идеи создания виртуальных производственных корпораций, когда предприятия с различной производственной структурой, территориальным расположением и номенклатурой продукции объединяют свои усилия по проектированию, производству, поставкам сырья и комплектующих в целях достижения конкурентоспособности конечного продукта [2];

6) на уровне страны. В этой связи заслуживает внимания опыт Японии по созданию и развитию отраслей промышленной автоматизации и робототехники. В 1950—1960 гг. Япония продемонстрировала быстрый рост, по своим темпам опережающий развитие других крупных капиталистических стран. Ускоренному экономическому росту способствовали, в том числе:

- широкое обновление изношенного и устаревшего заводского оборудования;
- государственные инвестиции в промышленность.

Позднее, в 1971 г., впервые был сформулирован курс на создание новой так называемой интеллектуалоемкой структуры производства. Переход к новому типу воспроизводства сопровождался развитием самостоятельных научно-исследовательских работ. Значительно возросли усилия государства и компаний не только в прикладных, но и в фундаментальных исследованиях в таких областях, как использование атомной энергии, освоение космического пространства, разработка информационных систем. В результате произошедших сдвигов в производстве Япония превратилась в одного из крупнейших в мире производителей роботов (более 50 % мирового производства) [3, 4].

Критерии автоматизации

Отдельная проблема — выбор критериев оценивания эффективности автоматизации. При решении конкретной задачи глобальный критерий в подавляющем числе случаев не используется. На практике используют множество разных критериев. Приведем некоторые из них:

экономические:

- максимизация прибыли;
- минимизация стоимости изделия;
- мода на автоматизацию;
- время окупаемости и т.п.;

технические:

- уменьшение времени обработки;
- снижение уровня брака;
- снижение затрат на изготовление *годного* изделия;
- энергосбережение;
- сокращение производственных площадей и т.п.;

безопасностные:

- уменьшение травматизма;
- охрана окружающей среды и т.п.;

социальные:

- улучшение условий труда рабочего;
- сокращение рабочего дня;
- решение демографических проблем;
- выпуск дешевой социально значимой продукции и т.п.;

государственные:

- производительность труда в стране;
- соблюдение заданного уровня автоматизации;

• планы или стимулирование производства средств автоматизации.

Естественно, что схемы автоматизации, реализованные по разным критериям, могут отличаться.

Иерархия производства

Все сложные современные изделия (самолеты, машины, роботы, компьютеры и т.п.) изготавливают по иерархической схеме. Только такая схема позволяет изготовить годное изделие по приемлемой цене. Теория иерархических схем производства изложена в работе [5].

Изложим основные положения и результаты этой теории. ***Узлом*** называют соединение нескольких деталей (или узлов более низкого уровня) с помощью набора технологических операций, завершающееся контрольной операцией. Оптимальные размеры узлов для механических операций при вероятности брака в несколько процентов лежат в диапазоне 3...20 элементов на всех уровнях иерархии. Такая иерархия позволяет в миллионы раз сократить вероятность брака конечного изделия по сравнению с бесконтрольной сборкой. При этом вариации размеров узлов в указанном диапазоне на годность изделия почти не влияют.

В современном производстве обязательная иерархическая структура производства редко может быть локализована в одном месте. По большей части элементы изделия изготавливают не только в разных цехах, а часто и в разных странах. Например, узлы мобильного телефона: микросхемы, дисплей, аккумулятор, элементы платы, программы — все изготавливают в разных странах и соединяют вместе только на этапе сборки. То же самое со сборкой автомобилей и т.д.

Иерархия в месте изготовления конечного изделия, как правило, имеет всего несколько уровней (1—3), а остальные узлы изделия поступают из других мест. Это в большой степени предопределяет стратегию автоматизации.

Абстрактная модель

Рассмотрим универсальную абстрактную математическую модель производства, которая, тем не менее, сохраняет существенные и измеримые характеристики реального производства. Подчеркнем важность характеристики "измеримые". Для исследования и моделирования работы реального производства параметры (характеристики) этого производства, входящие в модель, должны быть физически (экспериментально) измеримы. Это могут быть, например, длительности выполнения технологических операции, вероятность брака и т.п. Принципиально важно, что, несмотря на громадное разнообразие видов технологических операций (ковка, сварка, сборка, завинчивание винта и т.д.), параметры модели (времена и вероятности) одинаковы! Длительность технологической операции определяется простым измерением времени выполнения, вероятность правильного выполнения — статистикой брака.

В предлагаемой абстрактной модели в качестве основных характеристик технологических процессов и характеристик автоматов выбраны следующие:

a — время выполнения технологической операции человеком;

b — время выполнения технологической операции роботом;

q — вероятность правильного выполнения технологической операции человеком;

p — вероятность правильного выполнения технологической операции роботом;

T — время жизни робота;

λ — стоимость единицы рабочего времени робота.

В процессе изготовления изделия часть операций выполняет человек, а часть операций автоматизирована. Для автоматизации операций используют роботы. Теоретически каждую технологическую операцию может выполнить или робот, или человек. Задача состоит в том, чтобы распределить выполнение технологических операций между роботами и людьми таким образом, чтобы время изготовления годного узла было минимально.

Будем использовать понятие "степень автоматизации", которое определяет, какую часть одинаковых технологических операций выполняет робот, а какую — человек. Степень автоматизации операции j-го вида α_j может принимать значения только в диапазоне от 0 до 1. При полной автоматизации все операции выполняет робот и $\alpha_j = 1$. На полностью неав-

томатизированном предприятии все операции выполняет человек и $\alpha_j = 0$.

В рамках модели стоимость (или время) изготовления выражается следующим образом:

$$C(\alpha) = \sum_{i=1,j=1}^{f,m} (1-\alpha_{ij}) n_j a_j + \sum_{i=1,j=1}^{f,m} \alpha_{ij} n_j \lambda_i b_{ij} + \sum_{j=1}^{m} n_j d_j, \quad (1)$$

где α_{ij} — степень автоматизации операции j-го вида роботом i-го типа;

a_j — время, затрачиваемое человеком на выполнение операции j-го вида;

n_j — число одинаковых технологических операций j-го вида, которое необходимо выполнить для сборки изделия;

b_{ij} — время, затрачиваемое роботом i-го типа на выполнение операции j-го вида;

λ_i — стоимости единицы рабочего времени робота i-го типа;

m — число используемых видов технологических операций;

f — число используемых видов роботов.

Коэффициенты автоматизации α_{ij} образуют матрицу автоматизации α:

$$\alpha = \begin{vmatrix} \alpha_{01} & \alpha_{02} & \cdots & \alpha_{0j} & \cdots & \alpha_{0m} \\ \alpha_{11} & \alpha_{12} & \cdots & \alpha_{1j} & \cdots & \alpha_{1m} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \alpha_{f1} & \alpha_{f2} & \cdots & \alpha_{fj} & \cdots & \alpha_{fm} \end{vmatrix}. \quad (2)$$

В матрице (2) первая строка определяет, какую часть технологических операций выполняет человек, а остальные строки определяют степень выполнения технологических операций роботами того или иного типа. Поскольку для изготовления изделия все виды операций должны быть выполнены (роботами или человеком), то сумма элементов в каждом столбце должна быть равна 1.

Поскольку $C(\alpha)$ является линейной функцией компонент матрицы α, то минимум по α функции (1) достигается на границе области определения, т.е. при значениях компонент, равных 0 или 1. Это значит, что оптимальная матрица автоматизации (2), при которой стоимость (1) минимальна, содержит только нули и единицы.

Изделие, изготовленное за время (1), может оказаться бракованным. Вероятность, что при данном распределении работ α не будет сделано ни одной ошибки, принимает вид:

$$P(\alpha) = \prod_{i=1,j=1}^{n,m} p_{ij}^{\alpha_{ij} n_j} q_j^{(1-\alpha_{ij}) n_j}, \quad (3)$$

где p_{ij} — вероятность правильного выполнения операции j-го вида роботом i-го типа;

q_j — вероятность правильного выполнения операции j-го вида человеком;

α_{ij} — степень автоматизации операции j-го вида роботом i-го типа.

Средняя стоимость годного изделия примет вид:

$$\bar{C}(\alpha) = \frac{\sum_{i=1,j=1}^{f,m} (1-\alpha_{ij}) a_j n_j + \sum_{i=1,j=1}^{f,m} \alpha_{ij} n_j \lambda_i b_{ij} + \sum_{j=1}^{m} n_j d_j}{\prod_{j=1}^{m} p_{ij}^{\alpha_{ij} n_j} q_j^{(1-\alpha_{ij}) n_j}} \quad (4)$$

и так как $P(\alpha) < 1$, возрастет.

Средняя стоимость изделия $\bar{C}(\alpha)$ является нелинейной функцией автоматизации, однако и для нее доказано [5], что минимум средней стоимости достигается, если матрица автоматизации содержит только 0 и 1. Но это только необходимые условия. Сам же минимум нужно искать полным перебором всех схем автоматизации.

Эта модель универсальна и применима ко всем дискретным производствам, независимо от физического вида конкретного технологического процесса.

Алгоритмы управления автоматизацией

Рассмотрим возможные алгоритмы управления уровнем автоматизации с помощью модели (1). Набор управляющих параметров, с помощью которых минимизируется заданный критерий, — это матрица автоматизации α и стоимость единицы рабочего времени робота λ, которое определяет выбор типа автомата (робота).

Схема автоматизации в большой степени определяется величиной партии узлов, которую необходимо изготовить, и стоимостью деталей, из которых собирается узел. Рассмотрим три случая:

1) изготовление одного узла с заданной вероятностью годности;

2) изготовление заданного числа годных узлов;

3) массовое изготовление годных узлов.

Отметим важность того, что во всех случаях будет вычисляться стоимость именно годных узлов. Именно она определяет схему автоматизации.

Изготовление одного узла. Стоимость изготовления одного узла $\bar{C}(\alpha)$ вычисляют по формуле (4), но этот узел будет годен только с вероятностью P, задаваемой формулой (3). Если требуется изготовить годный узел с вероятностью $P_з$ большей, чем P, то затраты увеличатся. Для решения этой задачи необходимо изготовить несколько узлов и из них выбрать годный. Встает вопрос: сколько необходимо изготовить узлов (годных с вероятностью P), чтобы среди них оказался один годный с вероятностью $P_з$.

Для изготовленной партии из n узлов с вероятностью брака $1 - P$ запишем вероятность того, что все узлы бракованные:

$$P_{бр} = (1 - P)^n.$$

При этом вероятность наличия среди изготовленных узлов хотя бы одного годного принимает вид:

$$P_З = 1 - (1 - P)^n. \quad (5)$$

В этих расчетах предполагается статистическая независимость брака и абсолютный контроль. В этом случае величина партии, которую необходимо изготовить, чтобы в ней с вероятностью не менее $P_з$ было не менее одного годного узла, определяется формулой:

$$n = \frac{\ln(1 - P_З)}{\ln(1 - P)}. \quad (6)$$

Соответственно, стоимость изготовления одного *годного* изделия возрастает в n раз.

Схема автоматизации существенно зависит от стоимости комплектующих деталей. Как и в неавтоматизированном производстве, при дорогих деталях иногда собранный узел, признанный негодным, выгоднее пересобрать и снова проконтролировать. Подробно эта проблема рассмотрена в работе [6].

Рассмотрим алгоритм автоматизированного изготовления одного узла с заданной вероятностью годности $P_з$.

1. По формуле (4) полным перебором всех возможных вариантов автоматизации (таких вариантов 2^{fm}) вычисляют стоимости узла $\bar{C}(\alpha)$.

2. Из полного набора стоимостей $\bar{C}(\alpha)$ для всех возможных схем автоматизации выбирают минимальную $\bar{C}(\alpha_{min})$ и соответствующую ей матрицу автоматизации α_{min}.

3. По формуле (3) вычисляют вероятность годности, соответствующую минимальной стоимости $P_{min} = P(\alpha_{min})$.

4. Если $P_{min} < P_з$, то процесс выбора схемы автоматизации заканчивается. Стоимость узла будет равна $\bar{C}(\alpha_{min})$.

5. Если $P_{min} > P_з$, то по формуле (6) вычисляют необходимое число экземпляров узла n, которое необходимо изготовить. Стоимость узла будет равна $n\bar{C}(\alpha_{min})$.

Отметим, что использование автоматов для изготовления единичного изделия оправдано только в том случае, если он загружен другими заказами и используется только его свободное время. В противном случае стоимость автомата (а не стоимость его рабочего времени) войдет в стоимость узла.

Пример 1. Расчет стоимости узла при разных схемах автоматизации.

Рассмотрим пример расчета стоимости узла в соответствии с формулой (4). При этом полагаем, что технологические операции для изготовления узла могут быть выполнены человеком или роботом. Исходные данные сведены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные расчета стоимости узла

Операции выполняет	Времена выполнения		Вероятности		Стоимость времени λ
	Операция 1	Операция 2	Операция 1	Операция 2	
Человек	$a_1 = 11$	$a_2 = 5$	$q_1 = 0{,}99$	$q_2 = 0{,}95$	$\lambda_0 = 1$
Робот 1	$b_1 = 2$	$b_2 = 6$	$p_1 = 0{,}98$	$p_2 = 0{,}98$	$\lambda_1 = 3$

Таблица 2

Средняя стоимость изготовления годного узла и вероятность его годности

№ п/п	Параметр	A	B	C	D
1	Вектор автоматизации $\alpha_1\alpha_2$	00	01	10	11
2	Средняя стоимость робота	4584	4834	3412	3592
3	Вероятность годности P	0,58	0,53	0,76	0,7
4	Стоимость единицы рабочего времени робота λ	4,58	4,83	3,41	3,60

Число одинаковых технологических операций: 1-го вида $n_1 = 9$, 2-го вида $n_2 = 8$. Ресурс робота $T = 1000$.

Стоимость единицы рабочего времени человека тождественно равна единице. Стоимость единицы рабочего времени робота в пересчете на время человека может быть как больше, так и меньше единицы. Но это не означает, что какой-то тип роботов имеет преимущество при разработке схемы автоматизации. В этом примере стоимость единицы рабочего времени робота в три раза дороже временных трудозатрат человека.

Проведенные по этим данным расчеты стоимости узла, изготовленного по всем возможным схемам автоматизации, сведены в табл. 2.

В табл. 2 рассмотрены все возможные схемы автоматизации. Оптимальной оказалась схема в клетке *C*4, когда все девять технологических операций 1-го вида выполняет человек, а восемь операций второго вида — робот.

Изготовленный по оптимальной схеме автоматизации узел будет годен с вероятностью 0,82. Если необходимо изготовить годный узел с гарантированной вероятностью 0,999, то в соответствии с (6) необходимо будет изготовить $n = \ln(1 - 0{,}999)/\ln(1 - 0{,}82) = 4$ узлов. Фактическая стоимость изготовления одного гарантированно годного узла возрастет в 4 раза. Это типичная задача при изготовлении опытных образцов.

Изготовление серии узлов. Другая распространенная задача производства — изготовление заданного числа N годных узлов с вероятностью не меньше $P_з$. Как и в случае изготовления одного узла, следует определить, сколько дополнительных узлов ΔN сверх N следует изготовить, чтобы среди них с вероятностью не менее $P_з$ было не менее N годных узлов.

Стоимость изготовления одного узла $\bar{C}(\alpha)$ вычисляют по формуле (4), с вероятностью P, задаваемой формулой (3).

Время сборки вычисляется по формуле (1) и при постоянных временах выполнения технологических операций a и b постоянно, независимо от того, был изготовлен годный или бракованный узел. Обозначим это время через $t(\alpha)$. Фактическое время изготовления кратно $t(\alpha)$ и зависит от того, сколько бракованных узлов было сделано, прежде чем появился годный. Таким образом, время изготовления годного изделия kt принимает только дискретные значения при $k = 1, 2, 3, \ldots$ и кратно t. Будем предполагать, что брак узлов статистически независим. В этом случае вероятностная функция распределения бракованных узлов будет описываться биномиальным распределением.

Вероятность того, что узел годен, обозначим через P, вероятность брака, соответственно, будет равна $1 - P$. Считая испытания независимыми, получим распределение годных и негодных узлов, описываемое биномиальным распределением. В соответствии с биномиальным распределением вероятность изготовить точно k годных узлов примет вид:

$$P_k = C_N^k p^i (1 - p)^{N-k}. \qquad (7)$$

Запишем вероятность того, что будет изготовлено узлов больше или равно k:

$$P_{\geqslant k} = \sum_{i=k}^{n} C_N^i p^i \left(1 - p\right)^{N-i}. \qquad (8)$$

Расчеты по формулам (7) и (8) показывают, что с увеличением величины партии N добавочное число узлов, обеспечивающее полное выпол-

нение заказа с вероятностью, например 0,99999, быстро приближается к выражению:

$$\Delta N = (1 - P)N / P.$$

То есть партия увеличивается всего на несколько процентов по сравнению с разами при изготовлении одного узла. Подробно эта ситуация анализируется в работе [7].

Задача состоит в выборе схемы автоматизации (т.е. вектора α) и вычисление, по крайней мере, необходимых (но возможно не достаточных) затрат на изготовление годного изделия с заданной вероятностью.

Производство средств производства

Автоматизация производства на предприятиях, изготавливающих средства производства, имеет свои особенности, главная из которых состоит в том, что сами средства автоматизации производят на тех же предприятиях. Системы, в которых используют автоматы, изготовленные в этой же системе, будем называть ***замкнутыми системами автоматизации***.

Проанализируем, как наличие возникающей "транспортной" обратной связи влияет на стоимость изготавливаемой продукции. Для этого рассмотрим завод по производству роботов. Стоимость изготовления робота на заводе, казалось бы, может быть вычислена по формуле (4). Однако проблема в том, что входящая в формулу (4) стоимость рабочего времени робота λ(α) зависит от технологии изготовления и схемы автоматизации. В замкнутой системе автоматизации робот тратит часть своего ресурса на изготовление таких же роботов следующего поколения. Поэтому для замкнутых систем более адекватным критерием автоматизации следует признать стоимость единицы рабочего времени робота.

Стоимость единицы рабочего времени робота, изготовленного на заводе с замкнутым циклом изготовления, задается следующим выражением:

$$\lambda(\alpha) = \frac{A(\alpha) + D(\alpha)}{TP(\alpha) - B(\alpha)}, \qquad (9)$$

где $A(\alpha)$ — затраты человека на изготовление робота непосредственно на заводе;

$D(\alpha)$ — затраты человека на изготовление внешних узлов и деталей;

$P(\alpha)$ — вероятность правильного изготовления робота;

$B(\alpha)$ — затраты робота на изготовление робота.

Для краткости приведем формулы только для случая, когда на заводе изготавливают только один вид роботов:

$$A(\alpha) = \sum_{i=1}^{m} (1 - \alpha_i) n_i a_i; \qquad (10)$$

$$D(\alpha) = \sum_{j=1}^{m} n_j d_j; \qquad (11)$$

$$B(\alpha) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i n_i b_i; \qquad (12)$$

$$P(\alpha) = \prod_{i=1}^{n} p_i^{\alpha_i n_i} q_i^{(1-\alpha_i) n_i}. \qquad (13)$$

Остальные обозначения были приведены ранее. Подробный анализ стоимости единицы рабочего времени робота λ(α) был приведен в работе [5]. Здесь приведем только некоторые результаты этого анализа, важные для выбора схемы автоматизации.

1. Любая схема автоматизации физически возможна только в области, где соблюдается неравенство

$$TP(\alpha) > B(\alpha). \qquad (14)$$

Вне этой области автоматизация невозможна.

2. Компонентами оптимального вектора автоматизации α_{opt} могут быть только 0 или 1.

3. Оптимальный вектор автоматизации, минимизирующий стоимость единицы рабочего времени робота, может быть найден полным перебором всех m схем автоматизации.

Пример 2. Расчет стоимости единицы рабочего времени робота при разных схемах автоматизации.

Рассмотрим пример расчета стоимости единицы рабочего времени робота, когда технологические операции для его изготовления могут быть выполнены человеком или роботом в соответствии с формулами (9)—(14).

Исходные данные сведены в табл. 3.

Таблица 3

Исходные данные для расчета стоимости единицы рабочего времени робота

Операции выполняет	Времена выполнения		Вероятности	
	Операция 1	Операция 2	Операция 1	Операция 2
Человек	$a_1 = 6$;	$a_2 = 15$	$q_1 = 0{,}99$	$q_2 = 0{,}95$
Робот 1	$b_1 = 2$	$b_2 = 4$	$p_{11} = 0{,}98$	$p_{12} = 0{,}98$

Таблица 4

Средняя стоимость единицы рабочего времени изготовленного робота

Параметр	Вектор автоматизации $\alpha_1\alpha_2$			
	00	01	10	11
Стоимость единицы рабочего времени робота	3,72	4,02	2,94	3,18
Вероятность годности робота	0,58	0,53	0,76	0,70
Остаток ресурса	575	507	714	629

Число одинаковых технологических операций: 1-го вида $n_1 = 99$; 2-го вида $n_2 = 8$. Ресурс робота $T = 1000$.

Проведенные по этим данным расчеты стоимости робота, изготовленного по всем возможным схемам автоматизации, сведены в табл. 4.

В табл. 4 представлены все возможные схемы автоматизации. Оптимальной оказалась схема с вектором автоматизации 10, когда все девять технологических операций 1-го вида выполняет человек, а восемь операций 2-го вида — робот.

Изготовленный по оптимальной схеме автоматизации узел будет годен с вероятностью 0,74. Если необходимо изготовить годный узел с гарантированной вероятностью 0,999, то в соответствии с формулой (6) необходимо будет изготовить $n = \ln(1 - 0{,}99)/\ln(1 - 0{,}74) = 5{,}14$ узлов. Фактическая стоимость изготовления одного гарантированно годного узла возрастет в 5 раз. Это типичная задача при изготовлении опытных образцов. Для серии роботов затраты будут меньше, как показано выше.

Вывод

Изложенная в статье общая концепция управления автоматизацией дискретного производства может быть использована руководителями предприятий при составлении планов развития и модернизации производственной базы. Приведенные алгоритмы определения оптимального вектора автоматизации, вычисления эффективности автоматизации и выбора схемы автоматизации при использовании нескольких видов роботов будут полезны начальникам цехов в целях оптимизации процесса сборочных операций.

Библиографический список

1. **Яковис Л.М.** От единого информационного пространства к единому пространству управления производством // Автоматизация в промышленности. 2013. № 1. С. 20—26.
2. **Андреев А.Г., Григорьев С.Н., Мартинов Г.М.** Перспективы развития кроссплатформенных компьютерных систем числового программного управления высокотехнологичного оборудования // Автоматизация в промышленности. 2011. № 5. С. 3—8.
3. **Аристова Н.И.** Управление степенью автоматизации в промышленности // Приборы. 2014. № 4. С. 50—55.
4. **Асаль Р.** Роботы и автоматизация производства: Пер. с англ. М.Ю. Евстигнеева и др. М.: Машиностроение, 2001.
5. **Чадеев В.М., Аристова Н.И.** Самовоспроизведение механических роботов. М.: СИНТЕГ, 2012. 312 с.
6. **Аристова Н.И.** Расчет стоимости повторной полуавтоматической сборки годного узла // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 3—6.
7. **Чадеев В.М., Аристова Н.И.** Оценка эффекта самовоспроизведения при производстве роботов // Тр. XII Всероссийского совещания по проблемам управления (ВСПУ-2014) ИПУ РАН. М., 2014.

УДК 658.527.011

А.А. Иванов, *д-р техн. наук*
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)
E-mail: ivanov_aa@nntu.nnov

Инструментальная оснастка сборочного модуля для соединения деталей в узел

Показано, что конструкция сборочной головки определяется видом соединения деталей в узел: путем геометрического или силового замыкания. Приведены схемы сборочных головок с вращательным и поступательным движением инструмента и их сравнительные характеристики с электро- и пневмоприводом. Даны принципиальные и конструктивные схемы сборочных головок для разъемных и неразъемных соединений с использованием различных технологий, позволяющие выработать оптимальные проектные рекомендации.

It is shown that the construction of the assembly head is determined by the type of connection of parts into units: by geometrical or force closure. Schemes of assembly heads with rotational and translational motion of the tool and comparative characteristics of the assembly head with electric and pneumatic actuators are presented. Principled and constructive schemes of the assembly head for detachable and permanent connections using different technologies which allow to elaborate optimal project recommendations are given.

Ключевые слова: сборочная головка, геометрическое и силовое замыкание, разъемное и неразъемное соединение.

Keywords: assembly head, geometric and force closure, detachable and permanent connection.

Важнейшей составляющей частью инструментальной оснастки сборочного модуля являются устройства соединения деталей в узел, к которым относятся сборочные головки СГ. Конструкция (СГ) определяется видом соединения деталей в узел: путем *геометрического* или *силового* замыкания.

При геометрическом замыкании к деталям собираемого узла добавляется ограничительная деталь (стопорная шайба, шплинт, штифт и т.п.), которая усложняет задачу автоматизации сборки (рис. 1, *а*). Это класс разъемных соединений, доля которых составляет примерно 60 %, в том числе доля резьбовых соединений — до 30 %.

Сравнительная характеристика сборочных головок

Тип СГ	Привод	
	Электрический	Пневматический
$M_{кр}$, Н·м	250	250
Мощность двигателя $N_{дв}$, кВт	0,6	1,5
Масса, кг	13	6
Длина, мм	720	486
Диаметр, мм	90	80

Силовое замыкание связано с пластической или упругой деформацией деталей узла (рис. 1, *б*). Это класс неразъемных соединений, например, запрессовка, развальцовка, подгибка. К ним относят также клепку, сварку, пайку и склеивание. Для обоих видов соединений используют СГ с вращательным и возвратно-поступательным движением инструмента (рис. 2).

Приведем сравнительную характеристику СГ с электро- и пневмоприводом для заданного крутящего момента $M_{кр}$ (таблица).

Недостатком СГ с пневмоприводом является низкий КПД, который обусловлен сжимаемостью рабочей среды.

Крутящий момент $M_{кр}$ для заворачивания болтов и шпилек в корпус рассчитывают по формуле

$$M_{кр} \cong 4\Delta_н f_р l d E_2/(1{,}3 + 0{,}7E_2/E_1),$$

где $\Delta_н$ — натяг в резьбе;

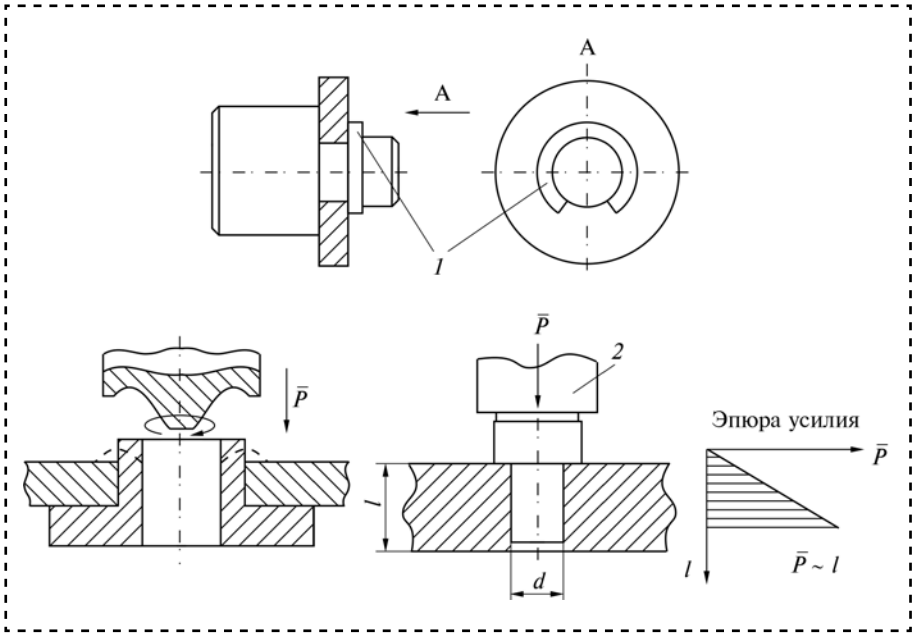


Рис. 1. Соединения методом геометрического *(а)* и силового *(б)* замыкания:
1 — стопорное кольцо; *2* — пуансон пресса

$f_р$ — коэффициент трения в резьбе;

l и d — длина и диаметр резьбы;

E_1 и E_2 — модули упругости материала шпильки и корпуса.

Наиболее ответственным этапом в резьбовом соединении является "наживление" гайки (или болта) на первые нитки резьбы шпильки (болта). Гайковерт должен обеспечивать необходимые параметры по несоосности и углу перекоса. Механическая головка для завинчивания гаек имеет стержневой захват с плоскими пружинками и соосный с ним шестигранный ключ для передачи крутящего момента $M_{кр}$ (рис. 3, *а*). Дозированное усилие затяжки резьбового соединения регламентируется динамометрическим ключом.

Операция "наживления" гайки на шпильку может быть в принципе выполнена с помощью тангенциальных струй сжатого воздуха (рис. 3, *б*). Эта схема гарантирует неповреждаемость резьбы в соединении.

Схема одношпиндельной СГ для завинчивания винтов и шурупов показана на рис. 4. Головка содержит два электродвигателя: *7* — для вращения шпинделя *5* с крестовой отверткой *4*; *8* — для поступательного перемещения инструмента с помощью тяговой пары "винт—гайка" *9* и вибробункер *11* с гибкой трубкой *10* для подачи винтов *2* сжатым воздухом в приемник (ловитель) *3*. После подачи винта в ловитель вращающаяся отвертка входит в контакт с винтом и дальнейшим ходом производит скрепление деталей *1*. С целью обеспечения качества резьбового соединения отвертке сообщаются ультразвуковые колебания через головку *6*.

Типовая СГ для прессовых соединений имеет сменный пуансон *2*, держатель деталей *1* и привод в виде гидроцилиндра *3* (рис. 5).

Формула для расчета необходимого усилия при запрессовке имеет вид

$$P = \Delta_н \pi d l f_п / 2(k_1/E_1 + k_2/E_2),$$

где $\Delta_н$ — натяг в соединении;

k_1, k_2 — коэффициенты, учитывающие форму деталей.

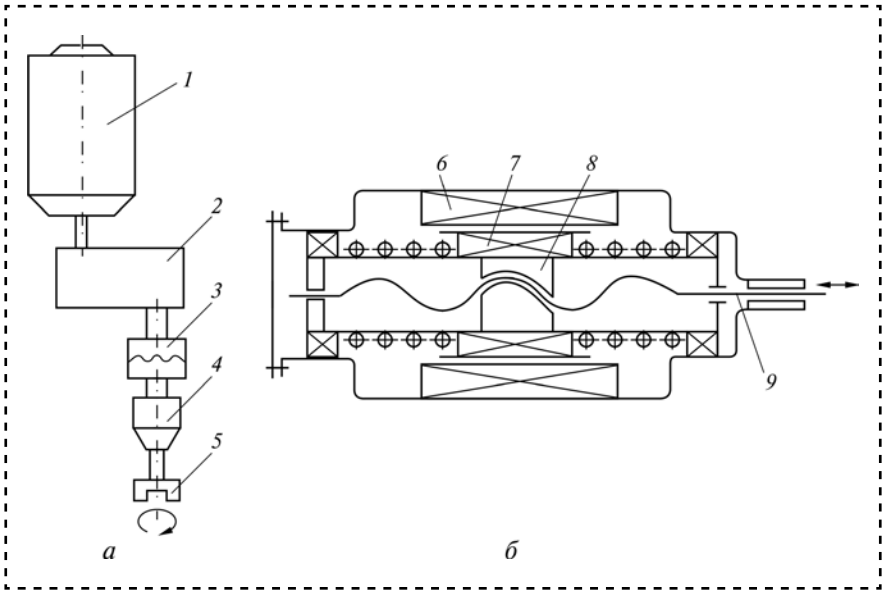


Рис. 2. Сборочные головки с вращательным *(а)* и поступательным *(б)* движением инструмента:
1 — двигатель; *2* — редуктор; *3* — муфта предельного момента; *4* — шпиндель; *5* — инструмент; *6* — статор; *7* — ротор; *8* — тяговая пара "винт—гайка"; *9* — вал

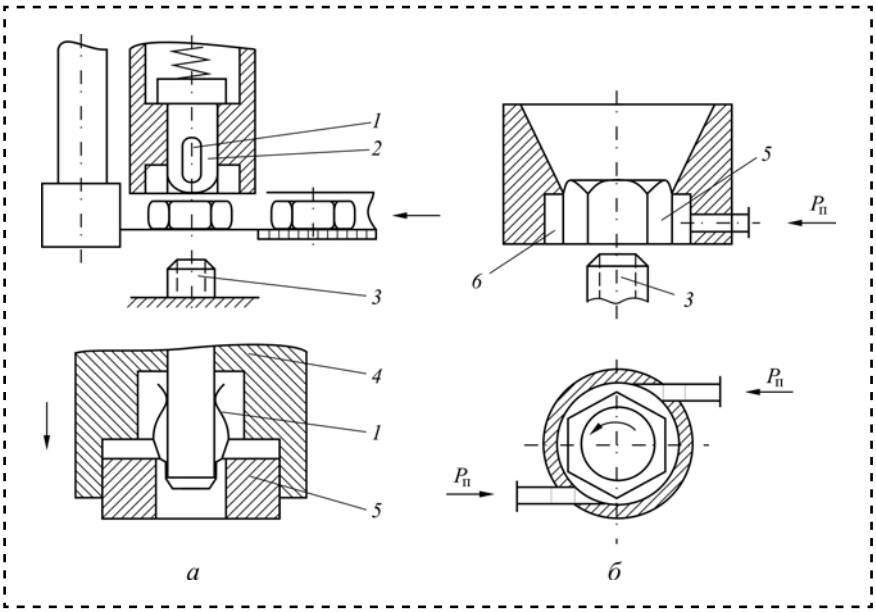


Рис. 3. Механическая (*а*) и пневматическая (*б*) головки гайковерта:
1 — пружина; *2* — захват; *3* — шпилька; *4* — гайковерт; *5* — гайка; *6* — пневмокамера; $P_п$ — давление питания сжатого воздуха

При тепловой сборке (например, с нагревом втулки) запрессовка не требуется. Температуру нагрева втулки рассчитывают по формуле

$$T = (\Delta_н + \Delta_з)/\alpha d,$$

где $\Delta_з$ — зазор при нагреве втулки;
α — коэффициент линейного расширения;
d — диаметр соединения.

Для неразъемных соединений деталей, полученных, например, методом холодной сварки, применяют ультразвуковую СГ, предназначенную для зажима, подачи, сварки и обрыва электродной проволоки.

Сварочная головка (рис. 6) содержит двигатель *4*, на котором установлены губки *2* для зажима проволоки, катушку *5* с электродной проволокой и закрепленный на общей оси ультразвуковой преобразователь *3* со сменным сварочным инструментом *1*. Губки *2* для зажима проволоки приводит в действие электромагнит *8*, а величину разжима губок регулируют специальным винтом. Обрыв и подачу электродной проволоки производят электромагнитами *6* и *7*, причем ход подачи регулируется. Гайка *9* обеспечивает регулировку давления сварочного инструмента на свариваемые детали.

Подобные СГ используют для ультразвуковой сварки внутренних проволочных соединений в корпусных интегральных микросхемах [1—3]. Ультразвуковые СГ широко применяют для выполнения неразъемных соединений различных деталей из пластмассы.

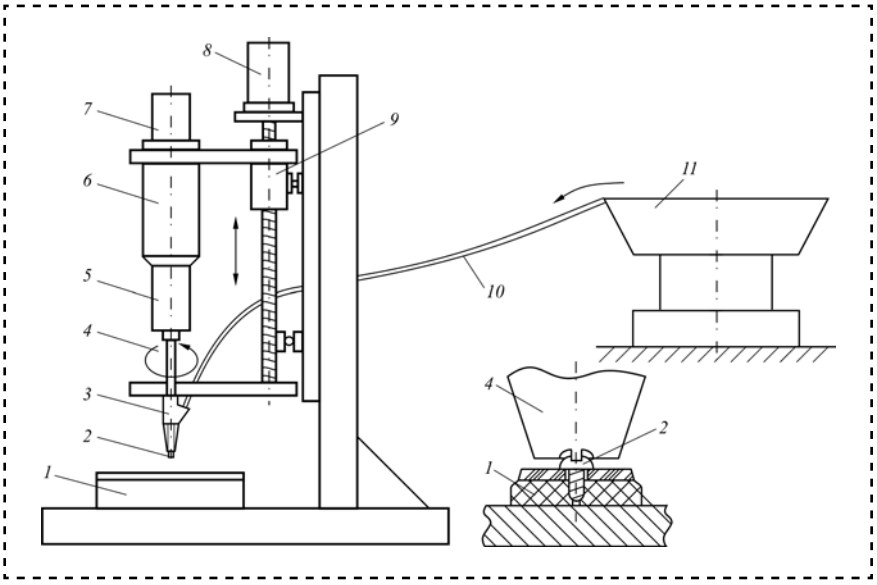


Рис. 4. Сборочная головка для резьбового соединения и скрепления деталей самонарезным винтом:
1 — скрепляемые детали; *2* — винт; *3* — приемник (ловитель) винта; *7* — двигатель вращения шпинделя *5* с крестовой отверткой *4*; *6* — ультразвуковая головка; *8* — двигатель перемещения шпинделя с отверткой; *9* — тяговая пара "винт—гайка"; *10* — пневмотрубка; *11* — вибробункер

Разновидностью неразъемных соединений являются клеевые соединения. На рис. 7 показана принципиальная схема СГ для клеевого соединения, содержащая захват *1* с деталью *2*, сменный инструмент *3* (например, рамку) для нанесения клея на поверхность детали контактным способом и ванну с клеем *4*. Конструкция клеевой СГ предусматривает программируемое перемещение инструмента в вертикальной плоскости. Движение инструменту сообщается от шагового двигателя через передачу "винт—гайка". В СГ предусмотрен регулировочный винт для обеспечения соосности клеевой

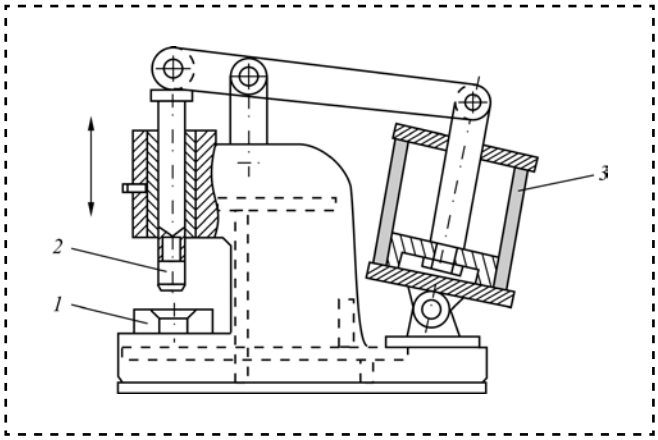


Рис. 5. Типовая прессовая сборочная головка:
1 — деталь; *2* — сменный пуансон; *3* — гидроцилиндр привода пуансона

рамки и захвата. Ширина клеевого оттиска зависит от величины зазора между рамкой и деталью, который можно регулировать [2].

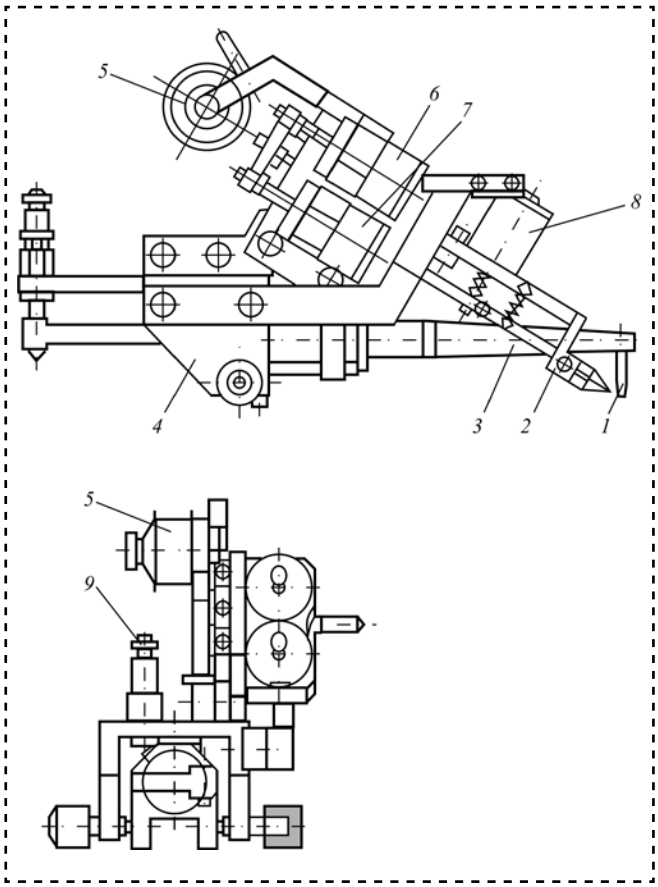


Рис. 6. Сборочная головка для ультразвуковой сварки деталей:
1 — сварочный инструмент; *2* — губки для зажима проволоки; *3* — ультразвуковой преобразователь; *4* — двигатель СГ; *5* — катушка с проволокой; *6*, *7* — электромагниты для подачи и обрыва проволоки; *8* — электромагнит привода зажимных губок; *9* — регулировочная гайка

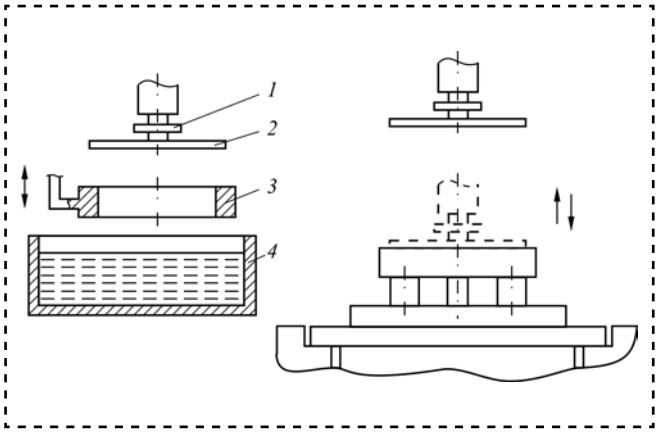


Рис. 7. Принципиальная схема СГ для клеевого соединения:
1 — захват ПР; *2* — деталь; *3* — рамка для нанесения клея; *4* — ванна с клеем

Продолжительность контакта инструмента с деталью составляет 0,2...0,3 с, после чего инструмент медленно опускается на 2...3 мм и останавливается на 0,5 с с целью исключения образования клеевых нитей. Рабочая часть рамки имеет тефлоновое покрытие, снижающее вероятность образования наслоений клея.

Выводы

1. *Конструкция СГ определяется видом соединения деталей в узел: путем геометрического или силового замыкания.*

2. *Даны рекомендации:*

- *по схемам СГ с вращательным и поступательным движением инструмента с учетом сравнительных характеристик СГ с электро- и пневмоприводом;*
- *по схемам СГ для разъемных и неразъемных соединений с использованием различных технологий, позволяющие выработать оптимальные проектные решения.*

Библиографический список

1. **Иванов А.А.** Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. М.: Форум, 2011. 224 с.

2. **Иванов А.А.** Автоматизированные сборочные системы: учебник. М.: ФОРУМ, 2012. 336 с.

3. **Иванов А.А., Москвичев А.А.** Проектирование автоматизированного сборочного оборудования: учеб. пособие. Н. Новгород: НГТУ, 2005. 124 с.

УДК 621.791.048

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

Пайка крупных массивных конструкций*

Рассмотрены технологии и приемы пайки крупногабаритных конструкций, приведены технологические приемы, условия и материалы пайки, обеспечивающие получение равнопрочных с паяемым металлом конструкций.

The technology and techniques of soldering large structures, given technological procedures, conditions and materials soldering, providing reception of equal strength with the base metal structures.

Ключевые слова: обсадные колонны, трубопроводы, крупногабаритные конструкции, автовакуумная пайка, наполнитель, плакирование, сорбенты, магнитная пайка.

Keywords: casings, pipelines, large structures, autovacuum brazing filler, cladding, sorbents, magnetic rations.

Часть 2

Надежность и долговечность работы центробежных компрессоров зависит от усталостной прочности наиболее нагруженного узла — рабочего колеса. Рабочее колесо собирают из двух дисков и лопаток, устанавливаемых между ними (рис. 14). Его диаметр достигает 1200 мм. Детали изготавливаются из сталей с высоким пределом текучести (до 900 МПа).

При сборке колеса, лопатки приваривают к дискам аргонодуговой сваркой с образованием таврового соединения. В целях получения соединения с необходимой усталостной прочностью угловые участки соединения дополнительно паяют с образованием больших галтелей (рис. 15).

При применении капиллярной пайки образуются галтели небольших размеров (катет, радиус), обычно не превышающие 1 мм. Галтель такого размера является серьезным концентратором напряжений и при вибрационной нагрузке значительно снижает усталостную прочность соединения. Известно, что равнопрочность соединения обеспечивается при условии равенства радиуса галтели двум толщинам стенки паяемой детали.

Для достижения высоких значений усталостной прочности соединения можно сформировать искусственные галтели необходимого размера путем нанесения перед пайкой на угловые участки пластичной паяльной пасты, состоящей из порошков медно-марганцевого припоя и металлического наполнителя, связанных раствором полимера.

После нанесения пасты ее сушат до затвердевания. Во внутреннюю полость колеса по-

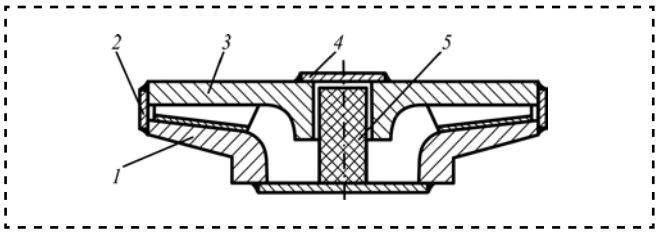


Рис. 14. Автовакуумная пайка рабочего колеса:
1 — диск; *2* — бандаж; *3* — диск с лопатками; *4* — технологическая заглушка; *5* — патрон с сорбентом и активатором

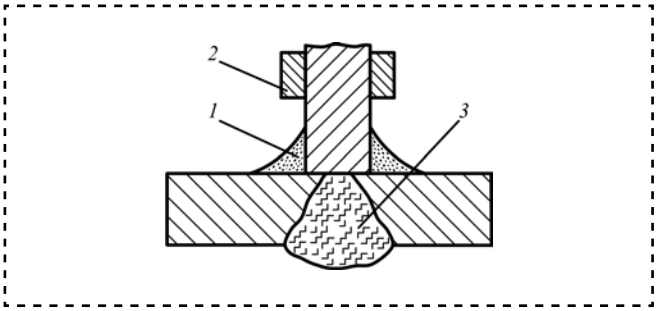


Рис. 15. Сварно-паяное тавровое соединение:
1 — галтель паяного шва; *2* — припой; *3* — сварной шов

* Начало см. № 2 за 2015 г.

мещают сорбент активного металла и производят герметизацию колеса путем приварки технологических заглушек и бандажа. При нагреве изделия в печи сорбент создает вакуум с низким парциальным давлением кислорода. При температурах свыше 600 °С поверхность паяемых деталей и частиц наполнителя очищается от оксидных пленок. Расплавляемый в процесс нагрева припой пропитывает каркас из частиц наполнителя, образуя плавную галтель с заданным радиусом, и заполняет оставшийся после сварки зазор. Состав порошков выбирают таким, чтобы в процессе пайки происходила активная взаимная диффузия между наполнителем и припоем. В качестве наполнителя широко используют железоникелевые сплавы.

При длительной изотермической выдержке в контакте частиц наполнителя происходит кристаллизация жидкой фазы, а между частицами жидкий припой диспергирует их. При выдержке 40...60 мин формируется однородный металл паяного шва, состоящий из легированной медью и марганцем матрицы, армированной сфероидальными частицами наполнителя размером 5...20 мкм.

Металл шва с такой однородной мелкодисперсной структурой имеет предел прочности 640 МПа и обеспечивает равнопрочность тавровых соединений с металлом изделия при соответствующем выборе величины галтели.

По технологическим условиям размеры частиц наполнителя составляют 50...150 мкм. Оптимальная температура пайки составляет 900...1050 °С, при этом происходит нормализация, закалка или аустенизация сталей колес.

Процесс пайки эффективно применяют для повышения несущей способности сварных стыковых соединений крупных изделий, механические свойства которых зависят от формы сварного шва и угла его перехода к основному металлу конструкции. При формировании выпуклой формы шва угол перехода может приближаться к 90°. Такие сварные соединения являются источником концентрации напряжений, которые снижают несущую способность конструкции. Применяемые технологические приемы, направленные на создание плавного перехода от шва к соединяемым элементам (механическая обработка, оплавление

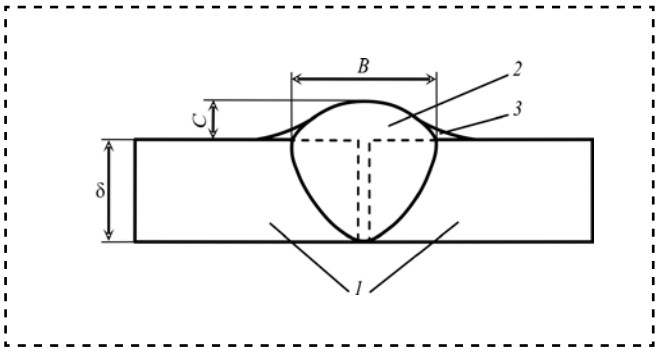


Рис. 16. Стыковое сварное соединение с дополнительными паяльными конструктивными элементами:
1 — соединяемые детали; *2* — сварной шов; *3* — паяные конструктивные элементы

границ шва теплом дуги или их наплавка) не всегда эффективны.

Определен новый метод снижения концентрации напряжений в сварных соединениях, основанный на использовании низкотемпературной пайки, с помощью которой создают дополнительные конструктивные элементы из материала с модулем упругости и температурой плавления меньшими, чем у материалов соединяемых деталей и сварного шва (рис. 16) [16].

Установлено, что для стальных соединений наиболее эффективным материалом является цинк, применение которого обеспечивает снижение уровня максимальных напряжений в 1,27 раза по сравнению с наплавкой ручной дуговой сваркой покрытыми электродами.

При использовании паяных конструктивных элементов область максимальных напряжений смещается от границы сварного шва к краю наплавки. Цинк имеет невысокую стоимость и хорошую коррозионную стойкость и может выполнять вторую функцию — защищать от преждевременного коррозионного разрушения наиболее опасную зону сварного соединения, прилежащую к сварному шву.

При увеличении высоты выпуклой части шва возрастает концентрация напряжений в области перехода от выпуклости к основному металлу. В этом случае более эффективным материалом для конструктивных элементов может оказаться применение меди.

При уменьшении высоты выпуклой части шва либо при увеличении радиуса перехода в этой области более эффективным материалом может оказаться кадмий, который создает ми-

нимальную концентрацию напряжений в месте перехода от пайки к основному материалу.

В качестве материалов для напаек могут быть применены сплавы-припои, которые, учитывая их большой выбор, обеспечат наиболее точный подбор требуемого в данном конкретном случае модуля упругости.

Технико-экономическая эффективность приведенного способа зависит от модуля упругости материала применяемого для создания напайки и ее размеров.

Высокотемпературная пайка играет ведущую роль в производстве современных промышленных конструкций, однако многие сложные технические задачи современного производства решают и с применением низкотемпературной пайки.

Разработанный в ИЭС им. Е.О. Патона способ "магнитной пайки" обеспечивает качественное формирование паяных соединений с широкими зазорами независимо от их положения в пространстве, что позволяет применить пайку в крупном промышленном строительстве. Этот способ может применяться при использовании как низкотемпературных, так и высокотемпературных припоев.

Сущность способа состоит в том, что в зазоре между соединяемыми элементами из ферромагнитных материалов (сталей) при стыковых, нахлесточных, телескопических и других типах соединений наводят постоянное магнитное поле, силовые линии которого пересекают зазор. Наибольший эффект достигается, если силовые линии магнитного поля перпендикулярны кромкам соединяемых элементов. Магнитное поле в зазоре можно создавать различными способами. Одним из простых способов является контактирование паяемых деталей с разноименными полюсами, например подковообразного магнита (рис. 17).

Можно использовать также электромагнит, что позволяет в нужных пределах изменять напряженность поля в зазоре. Использование постоянного магнита еще больше упрощает процесс пайки, так как не требуется электропитания, что очень удобно при выполнении пайки в полевых условиях, на строительных площадках и т.д.

В зазор между соединяемыми разделками деталей помещают композитный припой, состоящий из смеси порошков, в котором тугоплавкий наполнитель имеет точку Кюри выше, чем температура пайки. Зону соединения нагревают до температуры плавления легкоплавкой составляющей припоя.

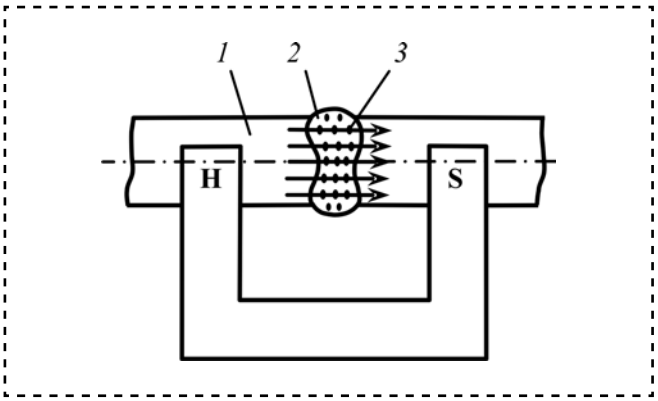


Рис. 17. Магнитная пайка:
1 — паяемые трубы; *2* — легкоплавкая фаза припоя; *3* — тугоплавкий ферромагнитный наполнитель

Благодаря внешнему магнитному полю частички наполнителя намагничиваются и равномерно распределяются вдоль магнитных силовых линий поля, удерживаясь в широких и неравномерных зазорах. Они удерживают расплавленную легкоплавкую фазу припоя, не позволяя ей вытечь за пределы паяльного зазора в период пайки.

Напряженность магнитного поля должна быть достаточной для удержания ферромагнитного наполнителя при расплавлении легкоплавкой составляющей и флюса, который позволяет вести процесс пайки на воздухе. Напряженность поля зависит от ширины зазора, сечения соединяемых элементов, количества и величины частиц тугоплавкого наполнителя. Магнитную низкотемпературную пайку успешно применяли при монтаже трубопроводных систем при строительстве жилых зданий.

Одной из важных задач в промышленности является поддержание работоспособности оборудования в процессе эксплуатации. К такому типу оборудования относятся железнодорожные и автомобильные цистерны, различного рода емкости и сосуды, трубопроводы, эксплуатируемые в нефтехимической и других производствах.

В процессе эксплуатации такого оборудования в нем образуется ряд дефектов, которые

приводят к полной или частичной остановке производственных или технологических процессов. Распространенная технология ремонта такого оборудования основана на использовании сварки, при применении которой возникает необходимость освобождения емкостей от продукта, а то и отправка на специализированное предприятие. Необходимость повышения эффективности использования железнодорожных цистерн подтолкнула к созданию новой технологии восстановления их работоспособности в экстремальных ситуациях, позволяющую устранять дефекты без освобождения цистерн. Во Владимирском государственном университете с применением магнитной пайки разработана технология экспресс-восстановления железнодорожных и автоцистерн, крупных емкостей, применяемых в нефтехимической промышленности и трубопроводов [17]. В целях безопасного ведения ремонтных работ процесс пайки осуществляется с применением специально разработанных низкотемпературных припоев на основе оловянно-свинцовых припоев. Нагрев дефектного участка осуществляется специально разработанным многостержневым паяльником. Разработанная технология позволяет устранять сквозные и несквозные дефекты в стенке сосудов (а.с. 97106647).

Гетерогенные композитные припои марок МАСМА-108, РИКЦ-1 и ПОСКиН-1 содержат тугоплавкую фазу, повышающую, по сравнению с известными припоями марок ПОС 40, ПОС 61, ПОС 90, прочность и вязкость припоя. Припои способны хорошо удерживаться в широких зазорах и сквозных отверстиях металлических оболочек, особенно при создании магнитного поля на дефектном участке.

В качестве тугоплавкой ферромагнитной фазы припои марок МАСМА-108 и РИКЦ-1 содержат железный порошок с чешуйчатой формой частиц, которые не нарушают капиллярные каналы и сдерживают рост дендритов в широких зазорах. В качестве упрочняющей фазы в припое марки ПОСКиН-1 служат интерметаллиды, типа $MgSn_2$, не только повышающие прочность припоя, но и замедляющие старение паяных швов.

Как показали исследования, припои марок ПОС 40, ПОС 61, ПОС 90 обеспечивают перекрытие при пайке отверстий диаметром до 4 мм, припой марки МАСМА-108 — до 6 мм, припой марки РИКС-1 — до 10 мм. Гетерогенные припои имеют более высокие механические свойства (рис. 18).

При создании на дефектном участке магнитного поля обеспечиваются более благоприятные условия формирования шва — жидкий припой удерживается в более широких зазорах. Припой марки РИКЦ-1 способен перекрывать отверстие диаметром до 16 мм, что в 1,6 раза больше, чем при отсутствии магнитного поля. При этих условиях облегчается выполнение вертикальных и потолочных швов.

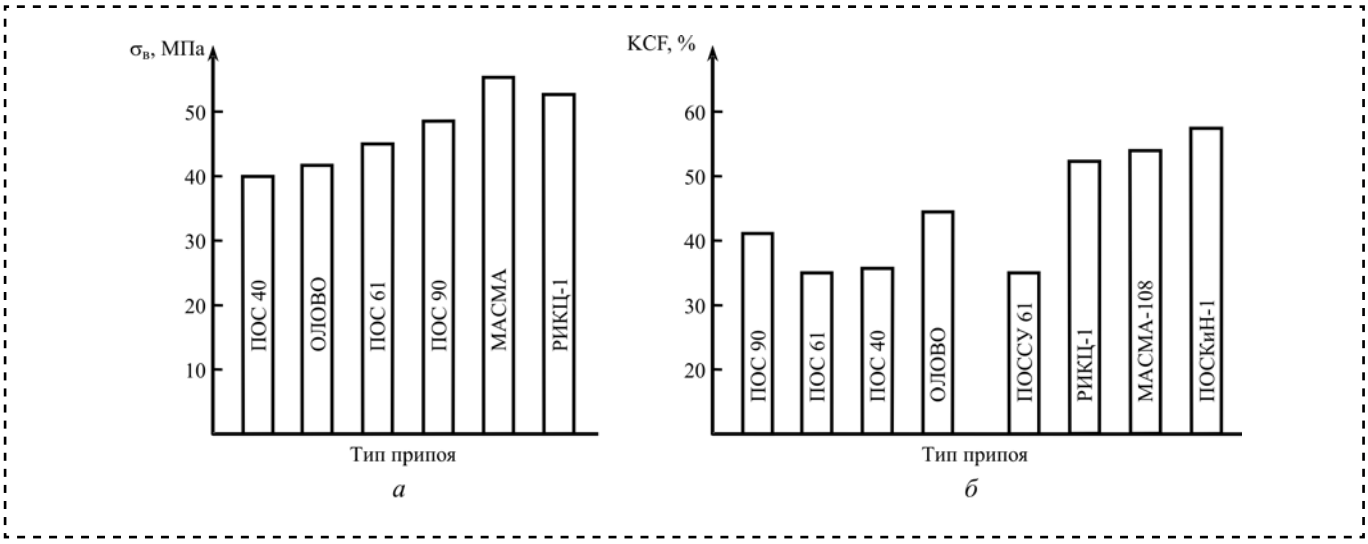


Рис. 18. Сравнительные диаграммы статической (*а*) и динамической (*б*) прочности припоев

Оптимальная величина индукции находится в пределах 0,1...0,2 Тл. Меньшая величина индукции не обеспечивает эффективного втягивания расплава припоя в широкий зазор и удержания его в широком отверстии. Большая величина вызывает неоднородное распределение тугоплавкой фазы в припое.

Испытания показали, что прочность стыковых соединений с широкими зазорами при магнитной пайке указанными припоями повышается по сравнению с оловянно-свинцовыми припоями на 26 %. Увеличение паяльного зазора повышает динамическую, но уменьшает статическую прочность соединений.

С целью повышения механических свойств толстый слой припоя разделяют прокладками, в частности, кольцевыми, на несколько тонких слоев. Путь, а следовательно, работа разрушения шва возрастают пропорционально числу слоев, а статическая прочность такого гетерогенного соединения практически сохраняется, как у тонкого слоя.

Для повышения механических свойств паяных участков с несквозными дефектами, возникающих, в частности, в результате местной коррозии, предлагается применять новый вид паяного соединения с регулярным рельефом, в котором шлицы одной соединяемой детали входят в пазы другой, а зазоры между ними заполняются припоем. Прочность таких соединений при магнитной пайке в 2...3 раза выше прочности стыковых соединений.

Выбирая различные параметры профиля и учитывая прочность металла соединяемых деталей, можно получить оптимальные для данных условий свойства соединений. Регулярный рельеф наносится на соединяемые детали при помощи портативного фрезерного устройства.

Применение технологических накладок позволяет устранить обнаруженные при диагностике несквозные дефекты, снижающие прочностные характеристики емкости и восстановить первоначальные прочностные характеристики емкости на 80...90 %. Разработка внедрена в ЗАО НПО "Технокранэнерго" (г. Владимир) и других организациях.

Библиографический список

16. **Снижение** концентрации напряжений сварных соединений с помощью пайки // Сварочное производство / Ю.А. Цумарев и др. 2014. № 3. С. 30—33.

17. **Худошин А.А.** Разработка и исследование высокопрочных соединений, паяных гетерогенными припоями // Автореф. дис. ... канд. тех. наук. Владимир, 2000.

УДК 621.039.533

Ю.В. Вытнов, **А.Г. Александрин**, **С.В. Голубев**, **Е.А. Герасимов**, *канд. техн. наук*,
Н.П. Медведев, *канд. техн. наук*
(ОКБМ Африкантов, г. Нижний Новгород)
E-mail: golubevsv@okbm.nnov.ru

Применение сплава МНА № 6 в качестве альтернативы при автоматической аргонодуговой наплавке направляющих и трущихся поверхностей деталей насосного оборудования для атомных реакторов на быстрых нейтронах

Рассмотрена возможность применения износостойкого сплава МНА № 6 для автоматической аргонодуговой наплавки направляющих и трущихся поверхностей деталей насосного оборудования для атомных реакторов на быстрых нейтронах. Приведено описание процесса выполнения износостойкой наплавки, принципиальная схема наплавочной установки, химический состав и фактическая твердость наплавки. Перечислены используемые методы контроля наплавки. Отмечены преимущества применения сплава МНА № 6.

The paper considers the possibility to apply the wear-resistant MNA No. 6 alloy for the automatic argon-arc overlaying welding of guide and friction surfaces of nuclear fast reactor pump equipment parts. It describes the process of performing the wear-resistant overlaying welding, presents the overlaying welding machine schematic diagram, the chemical composition and actual hardness of the overlay, lists overlaying welding inspection methods, and notes advantages of the MNA No.6 alloy application.

Ключевые слова: автоматическая аргонодуговая наплавка, насосное оборудование, направляющая и трущаяся поверхность.

Keywords: machine argon-arc overlaying welding, pump equipment, guide and friction surface.

На Белоярской АЭС установлен самый мощный в мире (тепловая мощность около 900 МВт) энергоблок с ядерным реактором на быстрых нейтронах БН-800, разработанный в АО "ОКБМ Африкантов".

Одним из наиболее ответственных элементов реакторных установок на быстрых нейтронах с точки зрения конструкции и технологии изготовления, является главный циркуляционный насос (рис. 1 на стр. 3 обложки).

В производстве АО "ОКБМ Африкантов" износостойкую наплавку направляющих и трущихся поверхностей деталей насосных агрегатов реакторных установок на быстрых нейтронах осуществляют сплавом на основе кобальта (стеллитом) прутками марки Пр-ВЗК ГОСТ 21449—75. Этот материал широко применяют для наплавки, так как он обладает высокой твердостью и износостойкостью, а также высокими коррозионной стойкостью и жаропрочностью.

Износостойкую наплавку применяют при изготовлении гидростатического радиального подшипника скольжения насоса.

Общий вид узла гидростатического подшипника представлен на рис. 2.

Технология наплавки трущихся поверхностей износостойкими материалами достаточно сложна в части обеспечения высокой температуры предварительного и сопутствующего по-

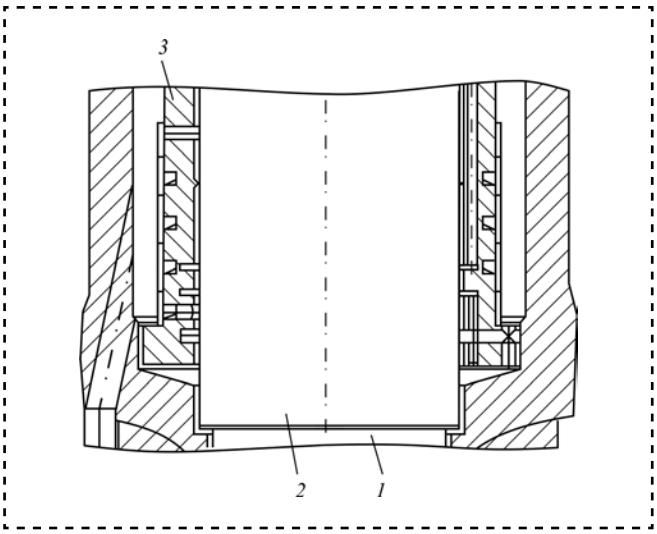


Рис. 2. Узел гидростатического радиального подшипника: *1* — вал рабочего колеса насоса; *2* — втулка подшипника; *3* — корпус подшипника

Химический состав прутков и твердость наплавки

Марка прутков	Содержание элементов, % мас.											HRC
	Co	C	Si	Cr	W	Ni	Fe	S	P	Mn	Mo	
МНА № 6 (Alloy № 6)	Основа	0,9...1,4	0...2,0	26,0...32,0	3,0...6,0	0...3,0	0...3,0	Не более 0,03	Не более 0,03	0...1,0	0...1,0	40...50
Пр-ВЗК	Основа	1,0...1,3	2,0...2,7	28,0...32,0	4,0...5,0	0,5...2,0	Не более 2,0	Не более 0,07	Не более 0,03			Не менее 41,5

догрева основного металла, а также качественного выполнения наплавки.

В качестве альтернативного наплавочного материала для изготовления узлов главных циркуляционных насосов РУ БН-800 были опробованы прутки марки МНА № 6 (Alloy № 6). Работы проводились совместно с ОАО НПО "ЦНИИТМАШ".

Химический состав прутков и твердость наплавки приведены в таблице.

В процессе проведения работ по наплавке прутками МНА № 6 (Alloy № 6) были выполнены:

- отработка технологии автоматической аргонодуговой наплавки на полномасштабный имитатор втулки подшипника;
- проверка технологических свойств наплавочного материала и качества наплавленной поверхности изделия.

Наплавку имитатора втулки подшипника выполняли на установке для автоматической аргонодуговой наплавки (рис. 3), разработанной в АО "ОКБМ Африкантов", на которой производится наплавка штатных изделий прутками Пр-ВЗК.

Установка состоит из поворотной колонны *1*, траверсы *2*, автомата *3* и водоохлаждаемой горелки *4*. Перемещение установки вдоль траверсы производится с помощью ходового винта *5*. Управляют перемещением сварочной установки с помощью электроприводов с автоматической системой управления.

Горелка отнесена от автомата с помощью штанги *6*, через которую подводят сварочный ток, защитный газ и охлаждаемую воду. Со стороны наплавочной горелки на автомате установлен теплозащитный экран *7*. Подача наплавочных прутков осуществляется роликами *8*.

Для обеспечения вращения в процессе наплавки заготовку устанавливают на роликовую опору и крепят к вращателю. Установка позволяет наплавлять детали наружным диаметром 340...600 мм и внутренним 230 мм и более.

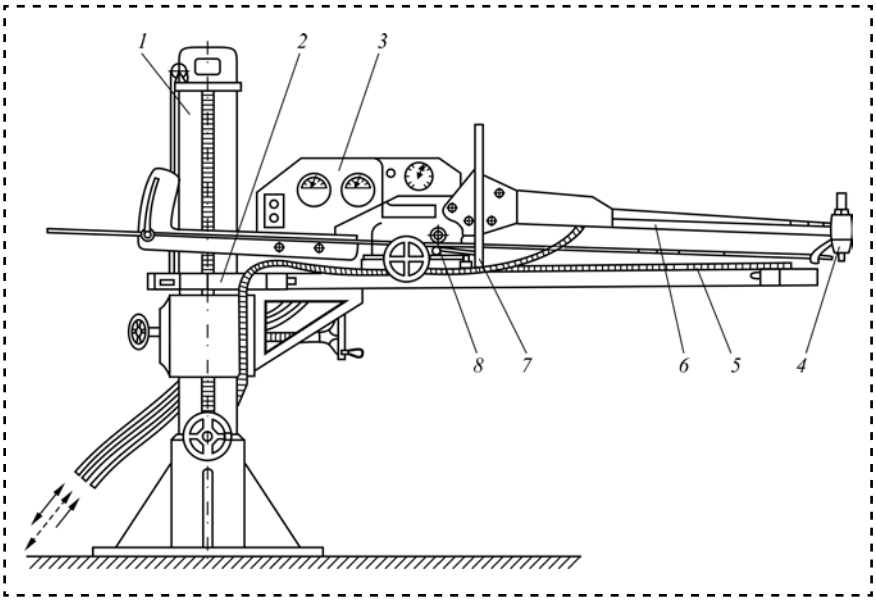


Рис. 3. Принципиальная схема установки для автоматической аргонодуговой наплавки

Отработку технологии аргонодуговой наплавки выполняли на заготовке из стали марки 10Х18Н9. В качестве неплавящегося электрода применяли иттрированный вольфрам, в качестве защитного газа — аргон высшего сорта. Общий вид втулки подшипника представлен на рис. 4.

Перед наплавкой и в процессе ее выполнения с помощью газопламенной горелки подогревали изделие изнутри. Контролировали температуру в про-

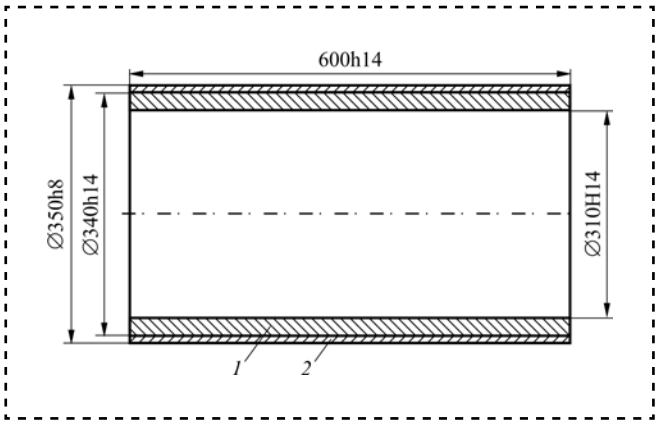


Рис. 4. Имитатор втулки подшипника:
1 — заготовка втулки; *2* — наплавка

цессе наплавки инфракрасным пирометром. Для уменьшения тепловых потерь в процессе наплавки заготовка закрыта теплоизоляционным кожухом.

Процесс автоматической аргонодуговой наплавки имитатора втулки подшипника представлен на рис. 5 на стр. 3 обложки.

Наплавку производили на постоянном токе прямой полярности в непрерывном режиме. Каждый последующий валик перекрывал предыдущий не менее чем на 1/3 ширины. После каждого слоя направление выполнения наплавки меняли на противоположное. В процессе наплавки контролировали температуру наплавляемой заготовки. Непосредственно после окончания наплавки для снятия внутренних напряжений производили термическую обработку.

В процессе наплавки было отмечено, что наплавочные прутки МНА № 6 (Alloy № 6) имеют следующие преимущества:

- хорошая технологичность с части наплавки;
- меньшее число стыков наплавочных прутков за счет большей длины наплавочного материала (длина прутков МНА № 6 составляет 1 м, Пр-ВЗК 0,4 м), при этом наплавленный металл равномернее ложится на наплавляемую поверхность и снижается количество слоев наплавки, что привело к снижению деформации втулки.

После наплавки и термической обработки была произведена механическая обработка втулки в размеры эскиза на рис. 4.

Контроль наплавленной поверхности выполняли в следующем объеме:

- визуальный осмотр и измерение;
- капиллярный контроль;
- ультразвуковой контроль по зоне сплавления;
- контроль твердости;
- металлографические исследования.

При визуальном и капиллярном контроле трещин и других недопустимых наружных дефектов обнаружено не было.

При ультразвуковом контроле поднаплавочных трещин также не обнаружено.

Металлографические исследования показали отсутствие внутренних дефектов в наплавке. Среднее значение твердости наплавки по поверхности составило 44...49 HRC при нормативных значениях 40...50 HRC.

Микроструктура наплавки и основного металла образцов-имитаторов представлена на рис. 6 на стр. 3 обложки.

Выводы

1. *Проведенные исследования прутков для наплавки МНА № 6 (Alloy № 6) показывают, что по химическому составу, твердости и качеству наплавленного металла данные прутки отвечают требованиям нормативной документации для направляющих и трущихся поверхностей.*

2. *Проведенные работы по технологии автоматической аргонодуговой наплавки наплавочными прутками МНА № 6 (Alloy № 6) втулки подшипника показали положительное качество наплавки:*

- *хорошее формирование наплавочных валиков;*
- *отсутствие дефектов в наплавленном металле;*
- *сохранение геометрических размеров втулки;*
- *уменьшение числа слоев наплавленного металла до четырех (ранее выполнялось шесть слоев) с обеспечением требуемой высоты наплавки.*

3. *Совместно с ОАО НПО "ЦНИИТМАШ" оформлено Техническое решение о применении прутков марки МНА № 6 (Alloy № 6) плавок Y89068A1 и Y87027B1 для наплавки направляющих и трущихся поверхностей деталей насосных агрегатов реакторных установок на быстрых нейтронах, которое было одобрено "Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору".*

4. *Результаты проведенной работы могут быть применены при изготовлении штатных узлов главных циркуляционных насосов реакторных установок на быстрых нейтронах.*

УДК 621.921

В.А. Носенко, *д-р техн. наук,* **В.Н. Тышкевич,** *канд. техн. наук,* **С.В. Орлов**
(Волжский политехнический институт
(филиал Волгоградского государственного технического университета))
E-mail: nosenko@volpi.ru

Обеспечение требуемого качества торцовых поверхностей колец подшипников шлифованием

Представлены алгоритм и методика определения оптимальных условий шлифования торцовой поверхности колец подшипников, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности при максимальной производительности процесса.

Algorithm and method is presented for determination of optimum terms grinding of end surface of bearing races, providing the receipt of the set requirements to quality of the treated surface at the maximum cutting efficiency of process.

Ключевые слова: кольцо подшипника, качество поверхности, осевая деформация, допуск плоскостности, шлифование.

Keywords: bearing race, quality of surface, axial deformation, admittance of flatness, grinding.

Введение

Для подшипниковой промышленности шлифование является одним из основных методов обработки, определяющих геометрическую точность деталей подшипников. Пути повышения геометрической точности шлифования подшипников качения определены в многочисленных российских и зарубежных исследованиях. Однако изготовление крупногабаритных подшипников связанно со значительными трудностями.

Эти трудности обусловлены сложностью достижения геометрической точности колец подшипников, имеющих начальные отклонения от плоскостности торцов в результате термообработки или предшествующих операций механической обработки.

Для обеспечения заданных геометрических параметров торцовые поверхности подвергают шлифованию. Наличие отклонений от плоскостности торцовых поверхностей существенно усложняет процесс шлифования, поскольку под действием магнитного поля стола станка кольцо получает упругую деформацию. После шлифования и снятия магнитного поля упругие деформации возвращают определенную величину отклонения от плоскостности обработанному торцу.

Различные технологические приемы, используемые для устранения отклонений от плоскостности торцов колец подшипников, существенно увеличивают время обработки и стоимость операции [1—6].

При шлифовании колец крупногабаритных подшипников, имеющих начальные отклонения торцовых поверхностей от плоскостности, необходимо учитывать упругие деформации, возникающие от действия магнитного поля стола и силы резания. Управление величиной упругих деформаций позволит уменьшить время и стоимость операции при гарантированном обеспечении геометрической точности детали.

Цель исследования — разработка алгоритма и методики выбора оптимальных условий плоского шлифования торцовых поверхностей колец крупногабаритных подшипников из стали ШХ15, обеспечивающих получение заданных требований к качеству обработанной поверхности (параметр шероховатости поверхности *Ra*, допуск плоскостности на операции шлифования Δ, отсутствие шлифовочных прижогов) при максимальной производительности процесса плоского шлифования.

Методика исследования

Математические модели приведенных к ширине образца составляющих силы резания (p_y, p_z), коэффициента шлифования ($K_ш$) и параметра шероховатости обработанной поверхности *Ra* получены методом полного факторного эксперимента типа 2^4, где 4 — число факторов:

$$p_y(F46) = 19{,}9 + 5{,}45x_1 + 3{,}43x_2 + 0{,}99x_3 + 3{,}67x_4 + 1{,}02x_1x_2 - 2{,}40x_1x_3 + 2{,}6x_1x_4 + 0{,}69x_2x_3 - 1{,}42x_3x_4 - 1{,}49x_1x_3x_4, \text{ Н/мм};$$

$$p_y(F60) = 31{,}42 + 0{,}91x_1 - 3{,}21x_2 - 1{,}02x_4 + 1{,}78x_1x_2 - 3{,}44x_2x_3 + 0{,}77x_3x_4 + 1{,}93x_1x_2x_3x_4 + 2{,}06x_1x_2x_3 - 3{,}078x_1x_2x_4 - 0{,}73x_1x_3x_4, \text{ Н/мм};$$

$$p_z(F46) = 6{,}21 + 0{,}82x_1 + 0{,}9x_2 + 0{,}82x_3 + 0{,}49x_4 - 0{,}54x_1x_3 + 0{,}23x_1x_4, \text{ Н/мм};$$

$$p_z(F60) = 9{,}18 + 1{,}86x_1 + 0{,}67x_3 - 0{,}27x_4 + 0{,}32x_1x_3 - 0{,}38x_2x_3 + 0{,}37x_3x_4 + 0{,}37x_1x_2x_3x_4 + 0{,}72x_1x_2x_3 - 0{,}35x_1x_2x_4, \text{ Н/мм};$$

$$K_ш(F46) = 44{,}77 - 5{,}06x_2 - 13{,}51x_3 + 6{,}15x_1x_3;$$

$$K_ш(F60) = 22{,}75 - 1{,}97x_1 - 5{,}83x_2 - 1{,}68x_3 - 2{,}61x_1x_2 + 1{,}71x_1x_3 - 4{,}77x_2x_3;$$

$$Ra(F46) = 1{,}81 - 0{,}22x_1 + 0{,}46x_3 - 0{,}22x_1x_3, \text{ мкм};$$

$$Ra(F60) = 1{,}92 + 0{,}27x_1 + 0{,}2x_2 + 0{,}29x_1x_2 + 0{,}3x_1x_3 + 0{,}26x_1x_2x_3, \text{ мкм}.$$

Экспериментальные исследования проведены при плоском шлифовании периферией круга образцов из стали ШХ15 [7]. Для обработки образцов в качестве инструмента использованы электрокорундовые шлифовальные круги прямого профиля с размерами 200×16×76 четырех типов: 25*AF*46*K*6*V*, 25*AF*46*L*6*V*, 25*AF*60*K*6*V*, 25*AF*60*L*6*V*. Инструмент изготовлен на ОАО "Волжский абразивный завод".

С учетом производственного опыта были выбраны следующие диапазоны варьирования входных факторов:

- *F* — зернистость (ГОСТ Р 52381—2005) — от *F* 60 до *F* 46;
- $c_1(x_1)$ — твердость шлифовального круга, определяемая звуковым методом по приведенной скорости распространения акустических волн (ГОСТ Р 52710—2007) — от 4504 м/с (*K*) до 4930 м/с (*L*);
- $t(x_2)$ — глубина шлифования — от 0,01 до 0,02 мм/ход;
- $v_s(x_3)$ — скорость подачи стола — от 10 до 20 м/мин.

В скобках дано условное обозначение кодированного фактора *x*.

В результате сравнения дисперсий выходных факторов процесса по критерию Кохрена было установлено, что в рассматриваемом диапазоне варьирования дисперсии выходных факторов неоднородны, т.е. не выполняется обязательное условие математического моделирования с использованием методики рационального планирования эксперимента. Снижение различия дисперсий достигается уменьшением интервала варьирования факторов.

С целью сохранения выбранных интервалов было принято решение о разделении некоторых факторов. Наибольшие дисперсии выходных параметров наблюдаются при шлифовании кругами различной зернистости.

Исходя из этого, математические модели выходных параметров процесса шлифования разрабатывали в отдельности для каждой зернистости. Дисперсии составляющих силы резания для кругов одной зернистости в данном случае можно считать однородными.

В результате анализа экспериментальных данных установлено, что в рассмотренном интервале варьирования составляющие силы резания на некоторых режимах шлифования значимо зависят от наработки. В связи с этим в качестве четвертого входного фактора была введена в математические модели наработка, приведенная к ширине обрабатываемой поверхности — $V(x_4)$ с интервалом варьирования от 100 до 400 мм^2.

Параметр шероховатости *Ra* задан в технологическом процессе. Образование шлифовочных прижогов на обработанной поверхности заготовки определяется величиной приведенной к ширине образца касательной составляющей силы резания p_z. В результате проведенных исследований установлено, что шлифовочные прижоги появляются при значениях $p_z > 6$ Н/мм.

Круги зернистостью *F*60 и твердостью *L* на всех режимах шлифования не удовлетворяют требованиям производства. Причиной является образование прижогов на обработанной поверхности или нестабильность процесса шлифования. Поэтому для обеспечения требований к качеству обработанной поверхности при оптимизации режимов круги зернистостью *F*60 исключены из рассмотрения.

Максимальные осевые упругие деформации определяются по методике [2—6] с использованием теории круговых стержней малой кривизны.

Результаты исследования и их обсуждение

Разработан алгоритм, приведенный на рисунке, и методика определения оптимальных параметров плоского шлифования периферией круга торцов колец крупногабаритных подшипников из стали ШХ15, обеспечивающая выполнение требований к качеству обработанной поверхности (отсутствие шлифовочных прижогов, заданные значения *Ra* и допуска плоскостности Δ) при максимальной производительности процесса.

На *первом этапе* при выборе оптимальных условий шлифования заготовку кольца рассматривают как абсолютно жесткую и оптимизацию параметров осуществляют из условия выполнения первых двух требований, т.е. обеспечения бесприжоговой обработки и заданного значения параметра шероховатости *Ra*.

С использованием ранее приведенных математических моделей определяют области существования параметров оптимизации, обеспечивающих выполнение требований к данным параметрам качества.

С использованием математических моделей *Ra* и p_z определены области допустимых значений параметров оптимизации.

Дальнейшую оптимизацию параметров в области допустимых значений осуществляют из условия обеспечения максимальной производительности процесса.

Для стали ШХ15 при допустимых значениях $[Ra] \leqslant 2{,}5$ мкм и $[p_z] \leqslant 6$ Н/мм получены следующие оптимальные параметры режима *1*: оптимальная глубина шлифования $t_{\text{opt}} = 0{,}02$ мм/ход; оптимальное значение скорости подачи заготовки $v_{s_{\text{opt}}} = 13$ м/мин при максимальной производительности $Q_{\max} = 260$ мм^2/мин.

Второй этап оптимизации при шлифовании колец подшипников с начальными отклонениями торцовых поверхностей от плоскостности заключается в необходимости учета осевых упругих деформаций при закреплении заготовки. Возможность использования магнитного поля стола станка для закрепления заготовки кольца реализуется при выполнении неравенства

$$w_q \leqslant [\Delta], \tag{1}$$

где w_q — максимальная осевая упругая деформация при закреплении заготовки кольца магнитным полем стола;

$[\Delta]$ — допустимая осевая упругая деформация кольца, $[\Delta] = \lambda\Delta - \Delta_m$. Здесь λ — коэффициент запаса точности; Δ — допуск плоскостности торцовой поверхности на операции шлифования; Δ_m — допуск плоскостности при шлифовании жесткой заготовки, определяемый из справочной литературы.

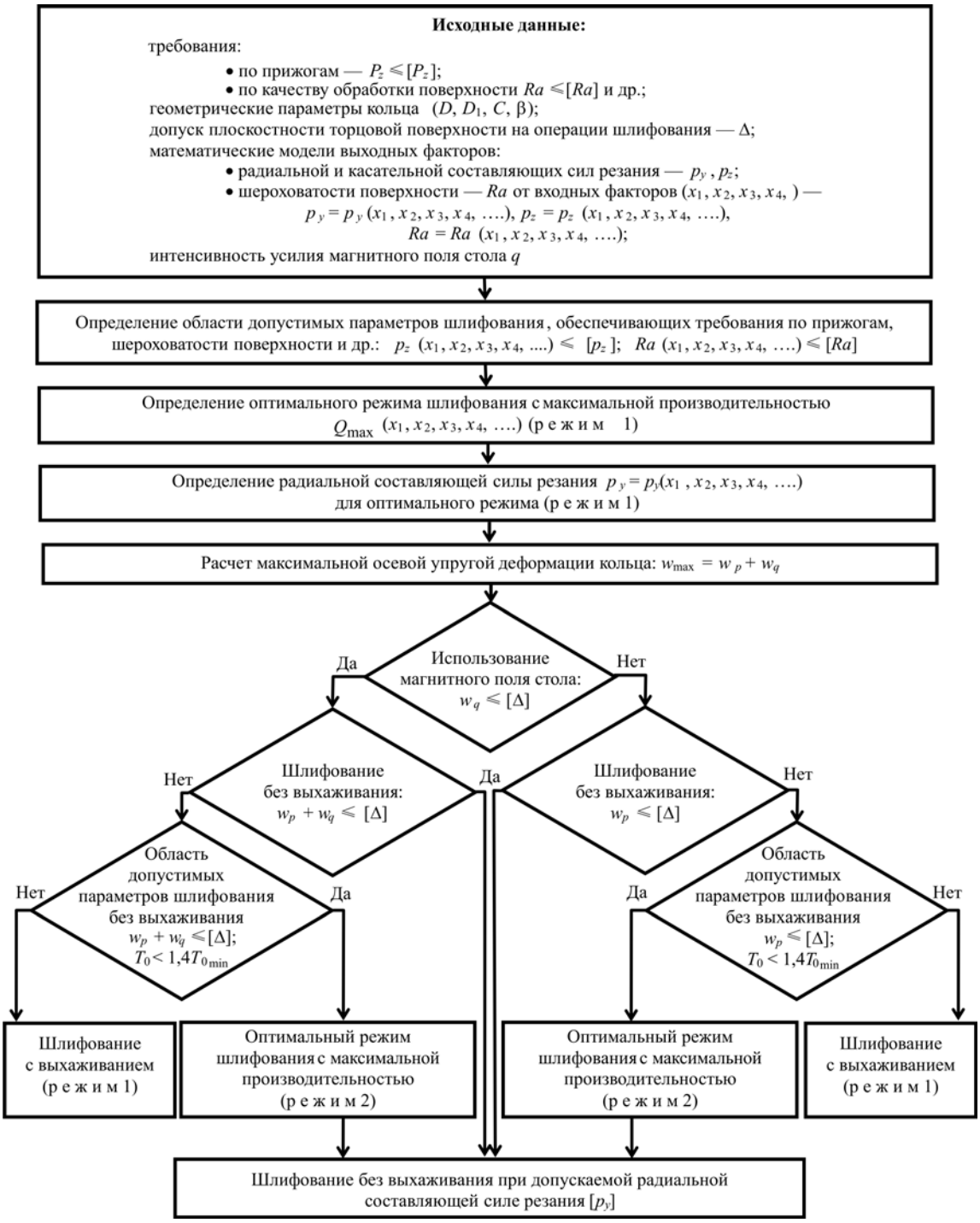
При невыполнении условия (1) заготовка кольца закрепляется на столе станка упорами.

При закреплении заготовки кольца магнитным полем стола возможность шлифования без выхаживания определена неравенством:

$$w_q + w_p \leqslant [\Delta], \tag{2}$$

где w_p максимальная осевая упругая деформация кольца при изгибе под действием радиальной составляющей силы резания.

При шлифовании заготовки кольца без закрепления магнитным полем допустимое зна-



Алгоритм выбора оптимальных условий шлифования заготовок колец подшипников с начальными отклонениями от плоскостности торцов

чение допуска плоскостности обеспечивается при выполнении неравенства:

$$w_p \leqslant [\Delta]. \quad (3)$$

Максимальные осевые упругие деформации определяют по методике [2—6] с использованием теории круговых стержней малой кривизны.

Если неравенства (2) и (3) не выполняются, заготовки кольца шлифуют с выхаживанием, что приводит к увеличению основного времени шлифования.

В таком случае в области ранее определенных допустимых значений параметров процесса целесообразно найти такие условия шлифования, при которых возможно выполнение следующих условий:

$$w_p + w_q \leqslant [\Delta];\ T_0 < 1{,}4T_{0_{\min}}, \quad (4)$$

где $T_{0_{\min}}$ — основное время шлифования без выхаживания при максимальной производительности обработки, параметры реализации которой были определены ранее.

При существовании области параметров процесса, удовлетворяющих условиям (4), выбор оптимальных условий шлифования осуществляют по критерию максимальной производительности. Полученные параметры процесса определяют оптимальные условия режима *2*.

Аналогичный подход реализован при определении оптимальных условий шлифования заготовок колец подшипников, закрепление которых на столе станка осуществляется упорами, без использования магнитного поля (см. рисунок).

Вывод

Представленные в статье алгоритм и методика позволяют определить оптимальные условия плоского шлифования периферией круга на станке с круглым магнитным столом колец подшипников с начальными отклонениями торцовых поверхностей от плоскостности. Критерий оптимизации — максимальная производительность процесса. Математические модели получены для плоского шлифования заготовок из стали ШХ15.

Библиографический список

1. **Коротков Б.И., Коротков С.Б., Тышкевич В.Н., Орлов С.В.** Исследование процессов шлифования внутренних и наружных конусов деталей класса колец / Под ред. Б.И. Короткова. Волгоград: ВолгГТУ, 2007. 133 с.
2. **Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В., Светличная В.Б.** Определение осевых перемещений при шлифовании торцов подшипниковых колец // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 2. С. 70—74.
3. **Копецкий А.А., Носенко В.А., Тышкевич В.Н., Орлов С.В.** Влияние упругих деформаций на погрешность формы при закреплении и обработке колец подшипников // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2/3. С. 103—107.
4. **Nosenko V.A., Tyshkevich V.N., Orlov S.V., Svetlichnaya V.B.** The determination of axial displacements during bearing end face grinding // Journal of machinery manufacture and reliability. Vol. 39. Issue 3. April 2010. P. 157—160.
5. **Kopetskii A.A, Nosenko V.A., Tyshkevich V.N.** Influence of shift of clamping forces on elastic deformations of the bearing ring in a jaw gripper // Journal of machinery manufacture and reliability. 2014. Vol. 43. No. 1. P. 55—59.
6. **Носенко В.А., Орлов С.В., Крутикова А.А.** Влияние режимов обработки и твердости круга на составляющие силы шлифования подшипниковой стали // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 4/3. С. 94—99.

УДК 621.825.54

М.П. Шишкарев, *д-р техн. наук,* **А.Ю. Угленко**
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)

Анализ точности срабатывания вариантов адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием

На основе исследования двух вариантов адаптивной фрикционной муфты второго поколения с раздельным силовым замыканием показано, что при одинаковых конструктивных параметрах вариант с независимым силовым замыканием фрикционных групп обладает более высокой точностью срабатывания.

Based on a study of two Adaptive friction clutches of the second generation with separate power circuit is shown, that at the same design as the option with the independent force closure of frictional forces has more precision.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, коэффициент точности, коэффициент усиления, вариант.

Keywords: adaptive friction clutch, coefficient of accuracy, gain coefficient, option.

Состояние вопроса

В адаптивных фрикционных муфтах (АФМ) второго поколения с раздельным силовым замыканием используется силовое замыкание пар трения основной фрикционной группы (ОФГ) и дополнительной фрикционной группы (ДФГ) от отдельных источников энергии [1, 2]. Это снижает требование к ограничению сверху величины коэффициента усиления (КУ) отрицательной обратной связи и повышает точность срабатывания АФМ.

Снижение требования по ограничению величины КУ обусловлено уменьшением влияния ДФГ на общую величину распорной силы, которая зависит от значения КУ, за счет снижения усилия замыкания пар трения ДФГ по сравнению с усилием замыкания пар трения ОФГ.

Исследование вариантов АФМ показало, что в зависимости от принципиальной схемы силового замыкания условия ограничения сверху величины КУ различные. Также различными являются и математические модели вариантов АФМ. В связи с этим можно предположить, что различными будут и показатели точности срабатывания вариантов АФМ.

Постановка задачи исследования. Сравнительное исследование точности срабатывания первого и второго вариантов АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием при одинаковых конструктивных параметрах.

База для исследования. Ранее выполненные исследования первого и второго вариантов АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием, полученные математические модели объектов и ограничения сверху величины КУ обратной связи.

Решение задачи

Объекты исследования — первый и второй варианты АФМ второго поколения с раздельным силовым замыканием — показаны соответственно на рис. 1 и 2.

По первому варианту АФМ (см. рис. 1) состоит из двух полумуфт *3* и *8*, которые связанны между собой двумя фрикционными

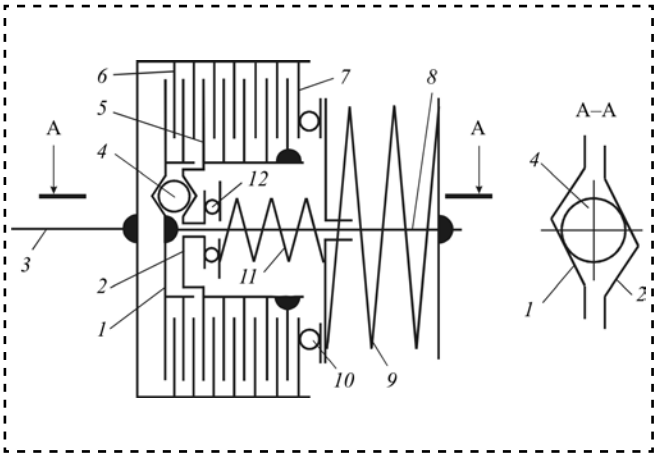


Рис. 1. Первый вариант АФМ с раздельным силовым замыканием

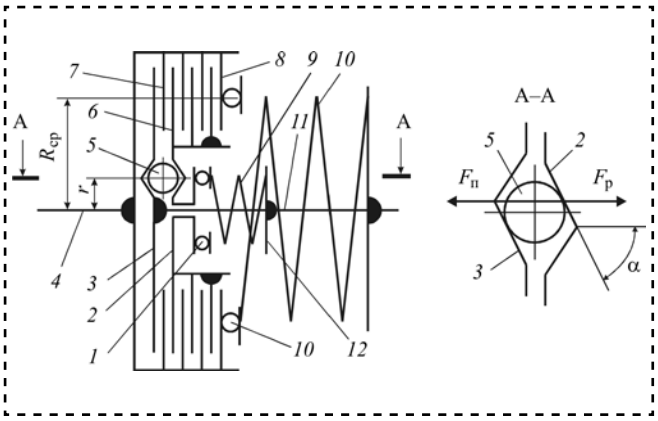


Рис. 2. Второй вариант АФМ с раздельным силовым замыканием

группами — ОФГ и ДФГ. ОФГ состоит из дисков трения *5* и *6*, связанных соответственно со ступицей нажимного диска *2* и с барабаном полумуфты *3*. Кинематическая связь дисков *5* и *6* соответственно с нажимным диском *2* и с полумуфтой *3* позволяет дискам перемещаться в осевом направлении для обеспечения прижатия их друг к другу.

Нажимной диск *2* не имеет кинематической связи со ступицей полумуфты *8*, кроме незначительного трения, практически не влияющего на точность срабатывания АФМ и на величину передаваемой ею нагрузки.

ДФГ состоит из нажимного диска *2* и фрикционного диска *7*, связанного с барабаном полумуфты *3*.

Управляющее устройство (УУ) муфты представляет собой тела качения *4*, размещенные в скошенных гнездах нажимного диска *2* и упорного диска *1*, который жестко закреплен на ступице полумуфты *8* (рис. 1, сечение А—А).

Общее силовое замыкание пар трения *5* и *6* ОФГ, а также пары трения *2* и *7* ДФГ осуществляется пружиной *9*, поставленной в муфту с предварительным натяжением.

Усилие пружины *9* передается на фрикционный диск *6* через упорный подшипник *10*.

Пружина *11* установлена между нажимным *2* и фрикционным *7* дисками: она предназначена для ослабления действия пружины *9* на пары трения ДФГ.

Для уменьшения трения между пружиной *11* и фрикционным диском *7* при буксовании муфты установлен упорный подшипник *12*.

Рассмотрим принципиальную схему второго варианта АФМ (см. рис. 2). Соосные одна другой полумуфты *4* и *11* связаны между собой двумя фрикционными группами. ОФГ состоит из дисков *6* и *7*, а также нажимного диска *2*, который лишен кинематической связи со ступицей полумуфты *11* в окружном направлении. ДФГ включает нажимной диск *2* и фрикционный диск *8*, который расположен по другую сторону от ОФГ относительно нажимного диска и связан с барабаном полумуфты *4*.

Связь дисков *6* со ступицей нажимного диска *2*, а дисков *7* с полумуфтой *4* осуществляется тем же способом, что и в первом примере.

УУ муфты включает тела качения *5*, размещенные в скошенных гнездах, которые выполнены на обращенных друг к другу торцовых поверхностях нажимного диска *2* и упорного диска *3*, жестко закрепленного на ступице полумуфты *11* (рис. 2, сечение А—А).

Общее силовое замыкание пар трения ОФГ и ДФГ осуществляется с помощью пружины *10*. Для уменьшения влияния трения на эксплуатационные характеристики АФМ между левым торцом пружины *10* и фрикционным диском *8* установлен упорный подшипник *13*.

Модернизация конструктивной схемы базового варианта АФМ второго поколения заключается во введении в конструкцию пружины *9*, которая осуществляет дополнительное силовое замыкание пар трения ОФГ. Пружина *9* справа (на рис. 2) опирается своим торцом на жесткий упор *12*, закрепленный на ступице полумуфты *11*. Для уменьшения трения при повороте нажимного диска *2* между последним и пружиной *9* установлен упорный подшипник *1*.

Число пар трения ДФГ в обоих вариантах АФМ может быть больше, чем одна.

Компоновка пар трения ОФГ в обоих вариантах муфты выполнена по схеме "ведущая пара (диск *7* — диск *3*) — ведомые пары (диски *6* — диски *7* — нажимной диск *2*)".

Математические модели первого и второго вариантов запишем соответственно как [1, 2]:

$$T_{п1} = F_п R_{ср} f \frac{z-(1-n)(Cf-1)}{1+(z-1)Cf}; \qquad (1)$$

$$T_{п2} = F_п R_{ср} f \frac{z(1+n')+1-Cf}{1+(z-1)Cf}, \qquad (2)$$

где $T_{п1}$ и $T_{п2}$ — предельные вращающие моменты первого и второго вариантов АФМ;

$F_п$ — сила натяжения пружины, как в первом *9* (рис. 1), так и во втором *10* (рис. 2) вариантах АФМ;

$R_{ср}$ — средний радиус поверхностей трения ОФГ и ДФГ (принят одинаковым);

f — коэффициент трения в парах ОФГ и ДФГ;

z — число пар трения ОФГ;

n и n' — коэффициенты, вычисляемые по формулам:

- для первого варианта

$$n = F_{п_1}/F_п; \qquad (3)$$

- для второго варианта

$$n' = F'_п/F_п, \qquad (4)$$

где $F_{п_1}$, $F'_{п_1}$ — силы натяжения пружины *11* (рис. 1) для первого и *9* (рис. 2) второго варианта АФМ;

C — КУ АФМ,

$$C = \frac{R_{ср}}{r}\,\mathrm{tg}\alpha. \qquad (5)$$

Здесь α — угол скоса боковой стенки гнезда под тела качения УУ (рис. 1, рис. 2, сечение А—А); r — радиус окружности, на которой расположены тела качения *4* (рис. 1) и *5* (рис. 2).

Схемы силового замыкания пар трения ОФГ и ДФГ в вариантах АФМ различные, что обусловливает также различные соотношения сил натяжения пружин *9* и *11* (рис. 1) и *9* и *10* (рис. 2):

- в первом варианте АФМ $F_{п_1} < F_п$;
- во втором варианте $F'_{п_1} > F_п$.

В соответствии с этим можно записать:

- в первом варианте АФМ $n < 1$;
- во втором варианте $n > 1$.

Ограничение сверху величины КУ для вариантов АФМ составляет:

- для первого варианта:

$$C \leqslant \frac{1}{(1-n)f_{max}}; \qquad (6)$$

- для второго варианта:

$$C' \leqslant \frac{1+n'}{f_{max}}. \qquad (7)$$

Соотношения (6) и (7) записаны при $z_1 = 1$ (где z_1 — число пар трения ДФГ), принято f_{max} — максимальное значение коэффициента трения.

При сопоставлении вариантов АФМ учитываем известный из работ [1, 2] результат: увеличение КУ повышает точность срабатывания муфты. Данный результат справедлив для формы нагрузочной характеристики АФМ, имеющей вид кривой, монотонно возрастающей в интервале f_{min} ... f_{max} (где f_{min} — минимальное значение коэффициента трения).

Данная форма кривой нагрузочной характеристики может быть реализована в том случае, когда величина КУ не превышает:

- для первого варианта АФМ:

$$C \leqslant \frac{\sqrt{1+(z-1)(z+1-n)/(1-n)}-1}{(z-1)f_{max}}; \qquad (8)$$

- для второго варианта АФМ:

$$C' \leqslant \frac{\sqrt{1+(z-1)\left[z(1+n')+1\right]}-1}{(z-1)f_{max}}. \qquad (9)$$

Формулы (6—9) заимствованы из работ [1, 2].

Поскольку коэффициент n отражает в обоих вариантах одинаковую форму отношения $F_{п_1}$ / $F_п$, при анализе будем принимать в вариантах сумму сил $F_п + F_{п_1} = \mathrm{const}$.

Данное решение обусловлено тем, что сила натяжения пружины влияет на ее размеры и массу, следовательно, параметр $F_п + F_{п_1}$, определяющий размеры и массу АФМ, будет корректным исходным параметром для сравнительного анализа вариантов АФМ.

Задача анализа — определение варианта АФМ, имеющего преимущество по точности срабатывания при одинаковых величинах n.

Установим, какая из величин C или C' больше. Это представляет интерес с точки зрения точности срабатывания АФМ, поскольку более высокое значение КУ будет соответствовать более высокой точности срабатывания.

Приняв в соотношениях (8) и (9) одинаковые значения всех параметров, составим предполагаемое неравенство $C > C'$. Это неравен-

ство составлено произвольно, не основываясь на каких-либо предварительных предположениях или выводах.

После некоторых преобразований приходим к следующему неравенству:

$$0 > -zn^2.$$

Полученное неравенство выполняется, следовательно, справедливо исходное неравенство. Таким образом, при реализации формы нагрузочной характеристики АФМ в виде кривой, монотонно возрастающей в интервале значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$, и при максимальных значениях КУ, соответствующих указанной форме, первый вариант АФМ, обладая большей величиной КУ, имеет более высокую, по сравнению со вторым вариантом, точность срабатывания.

Данный результат считаем предварительным, учитывая, что он не дает полного и достоверного представления о соотношении точности срабатывания вариантов АФМ.

Учитывая поставленную задачу, рассмотрим численное соотношение предельных величин КУ по выражениям (6) и (7). По условию задачи величина n условно одинаковая для обоих вариантов АФМ с той оговоркой, что для первого варианта $n < 1$, а для второго варианта величина

$$n' = \frac{1}{n} > 1. \qquad (10)$$

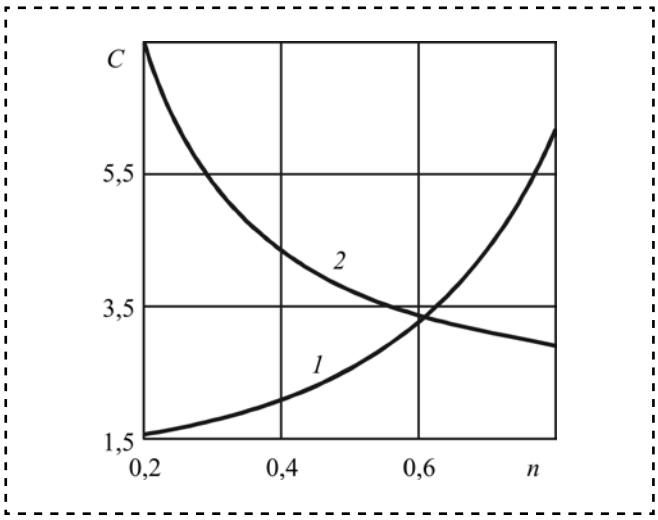


Рис. 3. Зависимости КУ от коэффициента *n*

Выражение (10) указывает на одинаковые соотношения между величинами сил $F_п$ и $F_{п_1}$.

Графики зависимостей $C(n)$, построенные по соотношениям (6) и (7) (кривая *1* и прямая *2* соответственно), показаны на рис. 3.

Графики построены при $f_{\max} = 0{,}8$. При построении прямой 2 использовано выражение (10); численные значения n', соответствующие значениям n, показаны на рис. 3.

Графики показывают, что при значениях n, не превышающих 0,62, предельная величина КУ первого варианта АФМ ниже, а при $n > 0{,}62$ — выше, чем величина КУ второго варианта.

В работах [1, 2] показано, что оба варианта АФМ при определенных значениях КУ могут иметь нагрузочные характеристики в форме кривых с максимумом внутри интервала $f_{\min} \dots f_{\max}$.

Если значения вращающего момента АФМ при граничных значениях коэффициента трения равны друг другу, то при реализации нагрузочной характеристики в форме кривой с точкой максимума внутри интервала $f_{\min} \dots f_{\max}$ точность срабатывания муфты будет максимальной [1, 2].

В упомянутых работах показано, что значения КУ, при которых точность срабатывания обоих вариантов АФМ максимальная, не превышают предельных значений, устанавливаемых соотношениями (6) и (7). Следовательно, второй вариант АФМ может обладать более высокой точностью срабатывания в случае реализации указанной формы нагрузочной характеристики.

Последнее предположение носит гипотетический характер, поскольку, как показывают исследования, при реализации указанной формы нагрузочной характеристики связь между точностью срабатывания АФМ и величиной КУ не всегда соответствует общеизвестной зависимости.

Установим влияние КУ на точность срабатывания при указанной нагрузочной характеристике вариантов АФМ.

В работах [1, 2] найдены зависимости для вычисления значения КУ, при которой, имея нагрузочную характеристику в форме кривой с максимумом, соответствующим значению коэффициента трения, принадлежащему

интервалу $f_{\min} \dots f_{\max}$, равны друг другу значения вращающих моментов при граничных значениях коэффициента трения.

Упомянутые зависимости имеют следующий вид:

- для первого варианта АФМ:

$$C_1 = \frac{\sqrt{(m+1)^2 + 4m(z-1)(z+1-n)/(1-n)} - (m+1)}{2(z-1)f_{\max}}; \quad (11)$$

- для второго варианта АФМ:

$$C_2 = \frac{\sqrt{(m+1)^2 + 4m(z-1)\left[z(1+n_1+1\right]} - (m+1)}{2(z-1)f_{\max}}, \quad (12)$$

где m — относительная ширина интервала изменения коэффициента трения, $m = f_{\min} \dots f_{\max}$.

Формулы (11) и (12) схожи между собой по структуре, однако имеют некоторые различия, которые не позволяют, без проведения должного аналитического исследования, однозначно утверждать о характере соотношения между величинами C_1 и C_2.

Положим $C_1 > C_2$. Используя формулы (11) и (12) в данном неравенстве, получим:

$$z > 0.$$

Полученное неравенство справедливо, следовательно, выполняется и исходное неравенство.

Если АФМ обладает указанной формой нагрузочной характеристики, то значение коэффициента точности определяется по соотношению:

$$K_{\text{т}} = \frac{T_{\text{п}}(f_{\text{к}})}{T_{\text{п}}(f_{\max}, f_{\min})}, \quad (13)$$

где $T_{\text{п}}(f_{\text{к}})$ — вращающий момент АФМ при коэффициенте трения $f_{\text{к}}$;

$f_{\text{к}}$ — коэффициент трения, при котором вращающий момент АФМ достигает максимума;

$T_{\text{п}}(f_{\max}, f_{\min})$ — вращающий момент АФМ соответственно при значениях $f_{\max}$ или $f_{\min}$ (вращающие моменты равны друг другу).

В работах [1, 2] также установлено, что значение $f_{\text{к}}$ обратно пропорционально значению КУ. Следовательно, для первого варианта АФМ величина $f_{\text{к}}$ может быть меньше, чем для второго варианта. Это косвенно может свидетельствовать о более высокой точности срабатывания первого варианта АФМ, однако на данной стадии исследования не может считаться истиной.

Запишем формулы для вычисления коэффициента точности первого и второго вариантов АФМ, используя для этого соотношения (1) и (2):

$$K_{\text{т}_1} = \frac{f_{\text{к}_1}\left[z-(1-n)\left(C_1 f_{\text{к}_1}-1\right)\right]\left[1+(z-1)C_1 f_{\max}\right]}{f_{\max}\left[z-(1-n)\left(C_1 f_{\max}-1\right)\right]\left[1+(z-1)C_1 f_{\text{к}_1}\right]}; \quad (14)$$

$$K_{\text{т}2} = \frac{f_{\text{к}_2}\left[z(1+n_1)+1-C_2 f_{\text{к}_2}\right]\left[1+(z-1)C_2 f_{\max}\right]}{f_{\max}\left[z(1+n_1)+1-C_2 f_{\max}\right]\left[1+(z-1)C_1 f_{\text{к}_2}\right]}. \quad (15)$$

В формуле (15) введен коэффициент C_2, поскольку его значение отличается от значения C_1 — соотношения (11) и (12). Значения коэффициентов трения $f_{\text{к}_1}$ и $f_{\text{к}_2}$ вычисляют по соотношениям [1, 2]:

$$f_{\text{к}_1} = \frac{\sqrt{1+(z-1)(z+1-n)/(1-n)} - 1}{(z-1)C_1}; \quad (16)$$

$$f_{\text{к}_2} = \frac{\sqrt{1+(z-1)\left[z(1+n)+1\right]} - 1}{(z-1)C_2}. \quad (17)$$

Сопоставить значения коэффициентов трения $f_{\text{к}_1}$ и $f_{\text{к}_2}$ в аналитической формуле (16) и (17) не представляется возможным из-за того, что $C_1 \neq C_2$.

Если $C_1 \neq C_2$, то один или оба варианта АФМ утрачивают рассматриваемую форму нагрузочной характеристики, и сопоставление точности срабатывания вариантов становится некорректным.

Таким образом, расчет значений $K_{\text{т}_1}$ и $K_{\text{т}_2}$ необходимо производить по следующей схеме:

— по соотношениям (11) и (12) вычисляют значения C_1 и C_2 при принятых исходных величинах параметров АФМ;

— используя найденные значения C_1 и C_2, вычисляют соответствующие им величины коэффициентов трения $f_{\text{к}_1}$ и $f_{\text{к}_2}$ по выражениям (16) и (17);

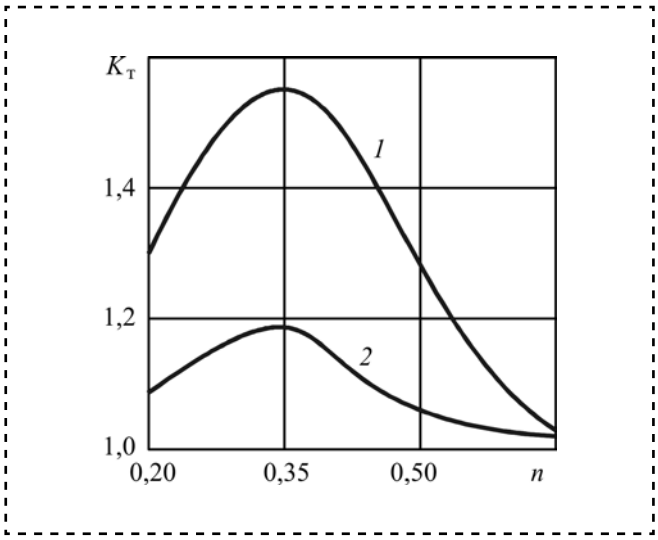


Рис. 4. Зависимости коэффициента точности АФМ от коэффициента *n*

— указанные действия повторяют в числе, равном числу варьируемых значений коэффициентов n_1 и n_2;

— используя вычисленные значения C_1, C_2, $f_{к_1}$ и $f_{к_2}$ в соотношениях (14) и (15), определяют значения коэффициентов точности $K_{т_1}$ и $K_{т_2}$, необходимые для построения графиков.

Примем следующие исходные данные: $m = 8$, $f_{max} = 0{,}8$, $f_{min} = 0{,}1$, $z = 4$.

Графики показаны на рис. 4. Кривая *1*, отражающая зависимость $K_{т_1}(n_1)$, построена по соотношению (14), кривая *2*, отражающая зависимость $K_{т_2}(n_2)$, построена по соотношению (15).

Графики, изображенные на рис. 4, показывают, что при реализации указанной нагрузочной характеристики АФМ второй вариант имеет преимущество перед первым вариантом по точности срабатывания. Уже при значениях коэффициента $n = 0{,}5$ коэффициент точности второго варианта АФМ близок к единице, что свидетельствует об очень высокой точности срабатывания, близкой к точности срабатывания так называемой "идеальной" АФМ.

Результаты исследования могут быть использованы при выборе, расчете и проектировании оптимального для конкретных условий эксплуатации варианта АФМ с раздельным силовым замыканием.

Выводы

1. *Для формы нагрузочной характеристики АФМ в виде кривой, монотонно возрастающей в интервале f_{min} ... f_{max}, существует определенный интервал значений коэффициентов n и n', в котором предельная величина КУ первого варианта меньше, чем величина КУ второго варианта, при одинаковых параметрах вариантов.*

2. *При одинаковых параметрах вариантов АФМ и в случае реализации формы нагрузочной характеристики в виде кривой, имеющей максимум внутри интервала f_{min} ... f_{max} при равенстве друг другу вращающих моментов, соответствующих граничным значениям коэффициента трения, точность срабатывания второго варианта выше, чем точность срабатывания первого варианта.*

3. *Точность срабатывания второго варианта АФМ при указанной в п. 1 форме нагрузочной характеристики и одинаковых с первым вариантом параметрах, кроме КУ, выше, чем точность срабатывания первого варианта.*

Библиографический список

1. **Шишкарев М.П., Лущик А.А.** Эксплуатационные характеристики адаптивной фрикционной муфты с раздельным силовым замыканием // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 3. С. 28—31.

2. **Шишкарев М.П., Угленко А.Ю.** Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 10. С. 3—7.

УДК 621.81.002.2; 621.71, 621.7.08

А.С. Ямников, О.А. Ямникова, *д-ра техн. наук,* **О.С. Кашмин,** *канд. техн. наук*
(Тульский государственный университет)
E-mail: yamnikovas@mail.ru

Эмпирические зависимости величины сближения контактирующих деталей при импульсной нагрузке

Показаны условия взаимодействия контактирующих поверхностей деталей узлов запирания стрелкового и автоматического оружия, отмечено влияние высоты и формы неровностей на контактную жесткость стыков узлов, а также описана методика эксперимента и оснастка для определения сближения контактирующих деталей при импульсном нагружении. Предложена степенная модель зависимости и с помощью центрального композиционного ротатабельного планирования эксперимента второго порядка получены полиномиальные зависимости сближения от качества поверхности, материала детали и его твердости, а также угла перекоса сопрягаемых поверхностей.

The conditions of interaction of contacting surfaces de hoists nodes locking arms and automatic weapons was shown, noted the influence you-cell and form roughness on the contact stiffness of joints nodes, and of describing, on the experimental method and apparatus for determining the convergence of wetted parts under impact loading. Proposed a power-law model of dependence and using a central composite rotatable experimental design of second-order polynomial obtained depending on the quality of convergence in surface, the part material and hardness, as well as the skew angle mating surfaces.

Ключевые слова: импульсное нагружение, сближение контактирующих деталей, планирование эксперимента, технологический параметр сопряжения.

Keywords: impulse loading, convergence of wetted parts, design of experiments, technological parameter of conjugation.

В современных машинах силовое взаимодействие контактирующих тел часто является ударным. Такие условия реализуются, например, в узлах запирания стрелкового и автоматического оружия. Контактная жесткость деталей зависит от состояния поверхностного слоя. Детали, входящие в узел запирания, испытывают большие динамические нагрузки, обусловленные характером работ изделия. Под их взаимодействием на стыковых поверхностях возникают контактные деформации, значения напряжений которых выше предела упругости материала контактирующих деталей. В начальный период эксплуатации появляются пластические контактные деформации, приводящие в конечном итоге к потере первоначально достигнутой точности сборки изделия или узла.

Контактирующие поверхности деталей имеют неровности (шероховатость, волнистость, отклонения формы), которые значительно снижают фактическую площадь контакта по сравнению с номинальной, что придает контактным деформациям превалирующее значение в балансе перемещений деталей [1]. Следовательно, между контактной жесткостью и геометрией поверхности существует тесная связь.

Контактная жесткость зависит от высоты и формы неровностей. Форма неровностей важна в отношении распределения материала в поверхностном слое, а также в отношении конфигурации и распределения по контактирующим поверхностям выступов, встреча которых при данных условиях нагружения и механических свойств материалов деталей и их поверхностных слоев определяет величину сближения.

Анализ количественных характеристик шероховатости поверхности может осуществляться различными методами и средствами. Например, в работе [2] зависимости несущей способности поверхностного слоя деталей

машин определены на основе параметров макроотклонений: H_{max} — максимального макроотклонения; H_P — высоты сглаживания макроотклонений; волнистости Wa, Wр, Wz, Sm_W; параметров шероховатости Ra, Rz, Rmax, tm, Sm, S и физико-механических свойств поверхности, характеризуемых параметрами микротвердости и остаточными напряжениями $H\mu_0$, $\pm\sigma_0$, $h\mu_0$, $h\sigma_0$.

Целью рассмотрения случайных функций поверхности и профиля, и разложения их на составляющие, является определение количественных параметров (зависимостей) двусторонних связей состояния поверхностного слоя с эксплуатационными характеристиками деталей узлов запирания, с одной стороны, и с физической природой механизма формообразования в процессе производства — с другой. Таким образом, появляются возможности технологически управлять качеством изделий или на этапе проектно-конструкторской разработки определять технологию изготовления деталей узлов и механизмов.

Отсюда следует, что можно исходя из данного значения контактной жесткости (сближения) назначать определенные условия обработки (технологию и режимы резания), обеспечивающие получение поверхностей деталей с необходимыми параметрами качества (шероховатость, волнистость, геометрическая точность формы, физико-механические свойства). Точность сборки контролируется достижением зазора *e* между торцами калибра *1* и затвора *2*, находящемся в остове *3* с полным контактом с упорами коробки *4*. Технологическая схема контроля параметров упругопластического сближения сопрягаемых деталей показана на рис. 1.

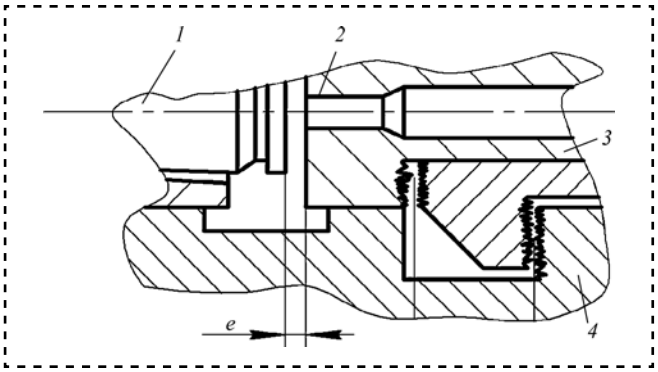


Рис. 1. Контроль измерений сближения деталей узла после приемосдаточных испытаний

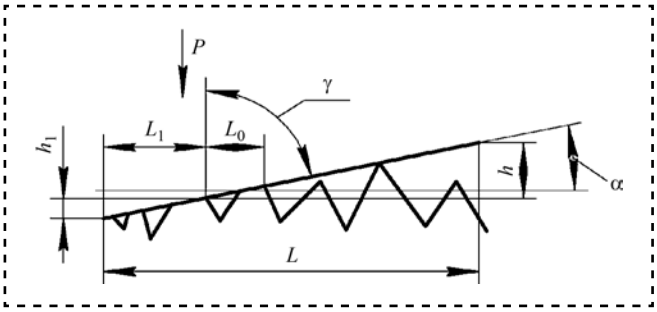


Рис. 2. Профиль шероховатости после нагружения силой *P*

Эти данные помогут конструктору назначить оптимальные параметры состояния поверхностного слоя, а технологу — оптимальные режимы обработки, обеспечивающие выполнение указанных требований конструктора. Контактирующие поверхности деталей машин имеют макро- и микронеровности, образованные на этапах механической обработки (рис. 2). Величина *a* — макроотклонения на длине *L*, полученные в результате обработки; h_1 — пластические деформации микронеровностей на длине L_1 после нагружения силой *P*.

Первоначальный контакт сопрягаемых поверхностей, как правило, происходит в трех точках. Напряжения, возникающие при приложении нормальной силы к такому стыку, значительно превосходят предел текучести вследствие малости площади контакта. Вершины выступов, вступившие в контакт, испытывают пластические деформации. Величина этих деформаций зависит от образования площадки контакта, способной воспринимать приходящуюся на него нагрузку,

$$A_{ri} = \frac{P_i}{C[\sigma_т]}, \qquad (1)$$

где A_{ri} — площадь фактической *i*-й площадки контакта;

P_i — нагрузка, действующая на данную площадку;

C — коэффициент увеличения предела текучести поверхностного слоя;

$[\sigma_т]$ — предел текучести данного материала.

С физической точки зрения коэффициент *C* представляет отношение между средним давлением на площадку контакта *P*, вызывающим пластическое течение, и напряжением

текучести $\sigma_т$, т.е. $C = P/\sigma_т$, причем он находится в пределах $C = 2{,}84...4{,}78$ [1]. При повторном приложении нагрузки, по величине не превышающей начальную, без взаимного смещения поверхностей, вершины выступов будут упруго деформироваться. Увеличение нагрузки при повторном ее приложении на несмещенные поверхности сверх первоначальной будет вызывать переход деформации вершин микронеровностей от упругих к пластическим.

С увеличением нагрузки происходят структурные изменения, которые резко меняют механические и физические свойства поверхностного слоя. Значительно возрастает предел текучести. Кроме того, увеличение нагрузки вызывает расширение зоны пластических деформаций, рост практической площади A контакта поверхностей как суммы элементарных площадок контакта

$$A = \sum_{i=1}^{n} A_{ri}. \qquad (2)$$

Дальнейшее увеличение нагрузки приводит к незначительным пластическим деформациям. При последующем нагружении без смещения в контакт вступают уже деформированные выступы, каждый из которых имеет определенную площадь контакта. Если площадь контакта при первом нагружении пропорциональна давлению в степени, близкой к единице, то при последующих нагружениях показатель степени колеблется от 0,50 до 0,88 [1].

Смещение поверхностей перед каждым новым приложением нагрузки вызывает упругие деформации уже пластически деформированных вершин выступов и пластические деформации вершин, ранее не вступивших в контакт. При многократных смещениях поверхностей контактирующих деталей и повторных нагружениях очевидно, что все большая часть вершин выступов будет деформироваться упруго и все меньшая — пластически. Многократное приложение нагрузок приводит к контактному разрушению пластически деформированных площадок контакта и образованию неровностей, процесс будет итерационным.

Задача расчета контактных деформаций в стыках решена в достаточном объеме лишь для случаев статического нагружения [3—5]. Для случаев же импульсного нагружения полных решений еще не получено. Можно при расчете контактных сближений при импульсном нагружении использовать поправочные коэффициенты, учитывающие характер прикладываемой нагрузки. При отсутствии дополнительных данных о реализации этой возможности, естественно, возникает необходимость в специальном эксперименте.

Напряжения и деформации за пределом упругости можно определить по приближенным эмпирическим зависимостям. Следует иметь в виду, что решение таких задач сопряжено с большими трудностями, поскольку математическое описание реальных сложных динамических систем в большинстве случаев невозможно. Следовательно, обоснованное суждение о поведении конструкций стрелкового и автоматического оружия в условиях ударного взаимодействия можно сделать, лишь используя результаты эксперимента. В частности, необходимо определить влияние состояния поверхностного слоя на величину сближения контактирующих деталей, работающих в условиях импульсного нагружения.

Основной задачей эксперимента является проверка возможности определения значения контактной деформации при импульсной нагрузке. Цель этой проверки заключается в установлении зависимостей для решения проектных задач по регламентации норм точности деталей автоматических машин.

Контактная податливость стыковых соединений зависит от большого числа факторов, что следует из формул для ее определения в условиях статических нагружений [5].

Проведенные опыты показали, что режимы нагружения оказывают влияние на интенсивность образования остаточных деформаций в поверхностных слоях контактирующих деталей. Однако неизвестно, в какой мере параметры состояния поверхности (высота неровностей, их шаг, твердость и другие) по отдельности или в совокупности определяют степень интенсивности изменения контактной податливости при изменении режимов нагружения.

При исследовании протекания контактных процессов в действующем изделии неизбежно проявление влияния факторов, обусловленных конструктивными и технологическими особенностями этого изделия. Так, взаимная ориентация деталей, зависящая от их собственной точности изготовления и точности сборки, инерционное сопротивление смещениям деталей с учетом приведенных к ним масс в условиях импульсных нагружений и другие подобные им факторы будут неизбежно проявляться в действующем изделии. Однако такие факторы не могут быть учтены по своей физической сущности и, следовательно, не могут быть оценены количественно.

При экспериментальных исследованиях учитывали требования моделирования процесса, протекающего в реальном механизме, в частности, в узле запирания стрелкового оружия:

1) зазора между контактирующими поверхностями нет;

2) нет смещения поверхностей деталей относительно друг друга при последующих нагружениях;

3) возникающие контактные напряжения примерно равны.

Контактные взаимодействия деталей механизмов автоматических машин характерны наличием большого числа факторов, составляющих специфику данного объекта исследования. В начальной стадии исследования неизвестно, насколько взаимосвязано проявление этих факторов, да и сами факторы могут быть названы только предположительно. Важным методическим условием чистоты эксперимента является разделение измеренной в опытах величины деформации на две составляющие. Первая из них обусловлена деформацией элементов рельефа контактирующих поверхностей, а вторая — объемными деформациями деталей, несущих эти поверхности.

При исследовании влияния качества поверхностного слоя контактирующих деталей, работающих в условиях импульсного нагружения, использовали образцы цилиндрической и плоской формы. Для проведения экспериментальных исследований влияния качественного состояния поверхностного слоя контактирующих деталей под действием циклических импульсных нагрузок была спроектирована и изготовлена специальная установка (рис. 3). Цилиндрические образцы имели диаметр 30 и длину 110 мм. Точность размеров образца позволила свести до минимума возможные его перекосы в корпусе в момент нагружения. Плоский образец 3 был выполнен в виде плиты, с размерами 140×50 мм и толщиной 30 мм.

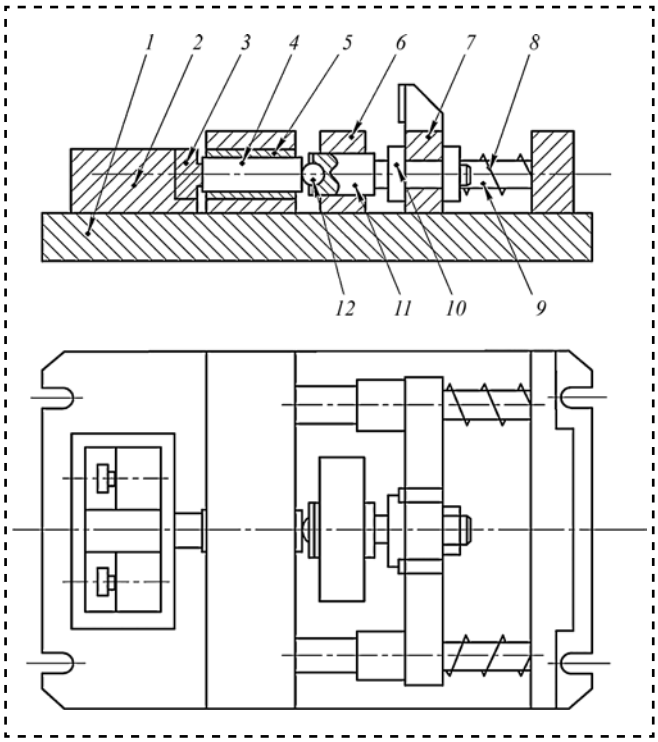


Рис. 3. Экспериментальная установка

Материал образцов — наиболее часто употребляемые в производстве стрелкового оружия стали марок 30ХН2МФА, 30ХРА, 35ХГСА, 50РА. Твердость, полученная после термообработки, составила 36...53 HRC. Чтобы получить равенство контактных деформаций, возникающих при работе реального механизма и при проведении эксперимента, на образцах выполнены выступающие площадки. Поверхность площадок подвергали механической обработке способами, предлагаемыми в качестве финишных операций, вместо ручной пригонки.

Был смоделирован процесс нагружения образцов, изготовляемых из широко применяемых при производстве стрелкового и автоматического оружия сталей. Установка воспроизводила ударный характер нагружения. Она

была смонтирована и закреплена на столе горизонтально-фрезерного станка. На плите *1* неподвижно установлен упор *2*, к которому при помощи винтов прикреплен плоский образец *3*. Цилиндрический образец *4*, имеющий с одной стороны выступающую площадку, а с другой — центровое отверстие, находится в корпусе *5*. На цилиндрической поверхности образца имеется шпоночный паз. В этот паз входит конец установочного винта, ввинченного в корпус *5* и предохраняющего образец от проворота. Удар создается парой пружин *8*, установленных на цилиндрических направляющих *9*.

По этим же направляющим перемещается серьга *7* с закрепленным в ней бойком *10*. Боек *10* в свою очередь контактирует с ударником *11*, находящемся в отдельном корпусе *6*. В торце ударника находится шарик *12*, который, устанавливаясь в центровом отверстии образца *4*, обеспечивает центральное направление удара. Сжатие пружин осуществляется перемещением серьги *7* кулачком, закрепленным в установленной в шпинделе станка оправке. Изменение степени сжатия пружин, а следовательно, и силы удара производится путем перемещения стола станка в вертикальном направлении. Со шпинделем станка связан счетчик числа оборотов или числа циклов нагружения.

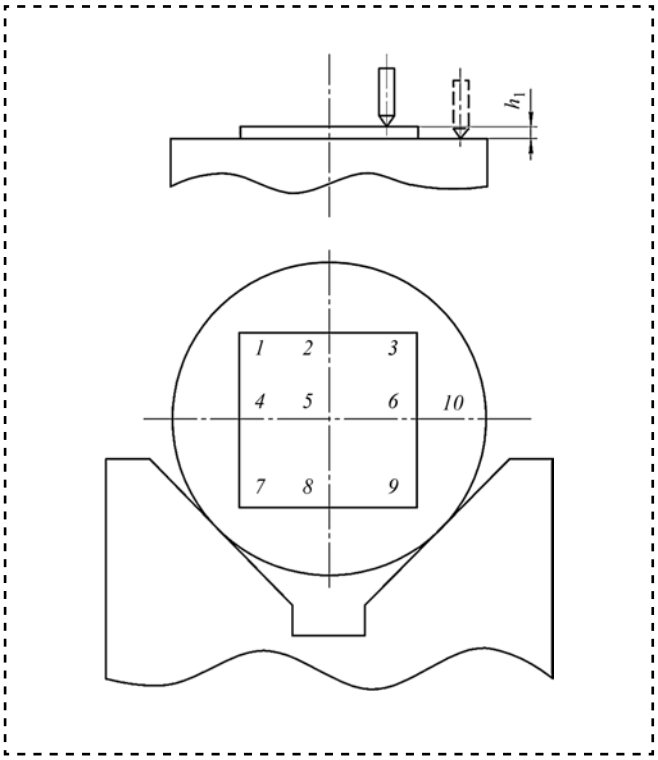


Рис. 4. Относительное измерение контактных деформаций

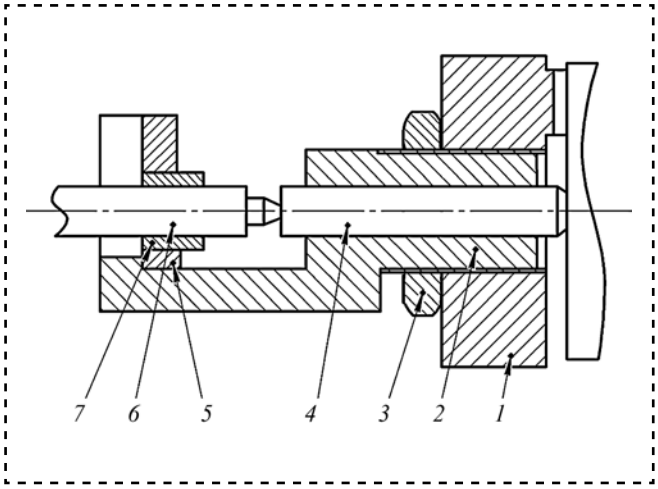


Рис. 5. Непосредственное измерение контактных деформаций

Как уже отмечалось ранее, на торце цилиндрического образца была выполнена выступающая площадка, поверхность которой исследовалась в ходе эксперимента.

Величину контактной деформации измеряли на вертикальном микроскопе относительным способом. Проводили измерение до эксперимента и после. Образец устанавливали в призме и поджимали струбциной. Сначала измеряли высоту точки *10* (рис. 4), а затем других девяти точек исследуемой поверхности.

Результаты измерения заносили в таблицу. При такой схеме измерения исключали погрешность установки в призме, и не учитывали деформации образца после нагружения. Если обозначить высоту точек профиля площадки (исследуемой поверхности) до эксперимента h_{in}, а после нагружения образца h_{jn}, то разность $(h_{in} - h_{jn})$ — есть величина деформации.

Кроме относительного измерения величины деформации осуществляли непосредственное измерение величины сближения. Для этого в образце *1* (рис. 5) выполнено отверстие, в которое ввинчивали и фиксировали с помощью контргайки *3* опорный элемент *2*.

На конце опорного элемента имелось гнездо для установки плиты *5* измерителя *6*. Измерителем был индикатор часового типа с ценой деления 1 мкм или индукционный датчик ИД8-3,

подключенный к цифровому микрометру. Измеритель *6* устанавливали и закрепляли во втулке *7*, запрессованной в плите *5*. Шток *4* устанавливали в отверстии опорного элемента непосредственно в момент измерения.

Такой принцип применялся Н.Б. Демкиным для измерения сближения двух поверхностей при статическом нагружении. Он исключает ошибки измерения деформаций, возникающих в других стыках. Погрешность такого вида измерения была в пределах 1,5...5,0 мкм. В основном это погрешность установки и самого измерителя. Так же как и при относительном измерении контактной деформации, шток *4* контактировал с точкой *10* (см. рис. 4) цилиндрического образца. Разработанный комплекс при задании всех механических, геометрических и других параметров сборочного соединения и условий нагружения позволяет смоделировать процесс осадки узла запирания и получить значение сближения Y в сборочном соединении.

Для проведения эксперимента авторами были отобраны следующие факторы: Ra — параметр шероховатости поверхности; HRC — твердость; α° — угол раскрытия стыка. В качестве выходного фактора выбрана величина сближения Y. Зависимость $Y = f(Ra, \mathrm{HRC}, \alpha^\circ)$ аппроксимировали полиномом второй степени. Эксперимент проводили по программе центрального композиционного ротатабельного планирования второго порядка.

Было сделано предположение, что зависимость сближения Y от исследуемых факторов можно представить уравнением регрессии степенного вида:

$$Y = CRa^{\beta}\mathrm{HRC}^{\gamma}\alpha^{\varphi}. \quad (1)$$

Уравнение (1) после логарифмирования примет вид

$$\ln Y = \ln C + \beta \ln Ra + \gamma \ln \mathrm{HRC} + \varphi \ln \alpha. \quad (2)$$

Результат эксперимента выражен полиномом вида

$$U = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + \\ + b_{23}x_2x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2. \quad (3)$$

В уравнении (3) $U = \ln Y$; а x_1, x_2, x_3 — кодированные значения факторов Ra, HRC, α°. Справедливость зависимости (1) устанавливали проверкой адекватности линейной части полинома (3).

Для ***стали 30ХРА*** уровни варьирования факторов были следующими:

$$x_1 = (Ra - 1,6)/1;\ x_2 = (\mathrm{HRC} - 42,5)/5,5;$$
$$x_3 = (\alpha^\circ - 0,13)/0,09;$$

экспериментальная модель получена в виде:

$$U = 10,889 + 2,8333x_1 - 2,6667x_2 + \\ + 5,2778x_3 + 0,3333x_1x_3 + 0,94444x_3^2.$$

Для ***стали 35ХГСА*** уровни варьирования факторов:

$$x_1 = (Ra - 1,6)/1;\ x_2 = (\mathrm{HRC} - 43)/5;$$
$$x_3 = (\alpha^\circ - 0,13)/0,09;$$

экспериментальная модель получена в виде:

$$U = 10,778 + 3x_1 + 2,0556x_2 + 5,5x_3 + \\ + 0,25x_1x_2 + 0,33333x_1x_3 + 0,25x_2x_3 + 0,94444x_3^2.$$

Для ***стали 50РА*** уровни варьирования факторов:

$$x_1 = (Ra - 2,8)/2,2;\ x_2 = (\mathrm{HRC} - 44,5)/4,5;$$
$$x_3 = (\alpha^\circ - 0,085)/0,055;$$

экспериментальная модель получена в виде:

$$U = 10,926 + 3,4444x_1 - 3,5556x_2 + 3,8889x_3 - \\ - 0,33333x_1x_2 + 0,58333x_1x_3 - 1,9167x_2x_3 - \\ - 0,77778x_1^2 + 0,55556x_2^2 - 0,77778x_3^2.$$

Для ***стали 30ХН2МФА*** уровни варьирования факторов:

$$x_1 = (Ra - 2,8)/2,2;\ x_2 = (\mathrm{HRC} - 43)/4;$$
$$x_3 = (\alpha^\circ - 0,085)/0,055;$$

экспериментальная модель получена в виде:

$$U = 11 + 4x_1 - 2,7222x_2 + 2,72222x_3 - \\ - 0,66667x_1x_2 + 0,58333x_1x_3 - 0,75x_2x_3 - 1,4444x_1^2.$$

Вывод

В результате обработки экспериментальных данных получены полиномиальные зависимости сближения от технологических факторов и качества поверхности, что является важным для разработки технологического процесса сборки, назначения норм геометрической точности деталей, выбора параметров установок, проектирования комплекса технологической и метрологической оснастки.

Библиографический список

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

2. **Дальский А.М., Кулешова З.Г.** Сборка высокоточных соединений. М.: Машиностроение, 1978.

3. **Васильев А.С., Грязев В.М., Ямников А.С.** Функционально связанные сборочные размерные цепи, обеспечивающие нормированный контакт поверхностей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 5. С. 36—40.

4. **Грязев В.М., Ямников А.С.** Решение размерных цепей с точностью, нормированной по пятну контакта поверхностей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 8. С. 22—26.

5. **Терехин Н.А., Ямников А.С., Ямникова О.А.** Взаимное влияние погрешностей формы и расположения сопрягаемых поверхностей на относительную площадь пятна контакта // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 10. С. 40—43.

6. **Грязев В.М., Ямников А.С.** Сравнительные характеристики поверхностной жесткости деталей автоматических машин // Справочник. Инженерный журнал с приложением. 2013. № 8. С. 7—13.

7. **Gryazev V.M., Yamnikov A.S.** Methodical bases of the solution of dimension chains with norm of soot surface contact // European science and technology. Oktober 30th—31st, Publishing offise Vela Verlag Waldkraiburg. Munich, Germany, 2012. Vol. I. P. 161—168.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru**
Телефон редакции журнала: (499) 269-54-98, факс 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* *Корректор Сажина Л.И.*
Сдано в набор 29.01.2015. Подписано в печать 16.03.2015. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.