ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ и производственный ЖУРНАЛ



В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.00 — МЕХАНИКА, 05.02.00 — МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ, 05.04.00 — ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ, 05.05.00 — ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

Том 20

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Дубовик Е.А. Технологичность конструкции привода стенда для испытания раздаточных коробок перемены передач грузовых автомобилей 195

Сборочно-сварочные работы. Пайка

Бых О.А., Вытнов Ю.В., Александрин А.Г., Соловьев Д.В., Голубев С.В., Герасимов Е.А., Бушмелев И.С. Автоматизация процесса сварки при ремонте парогенераторов реакторных установок атомных ледоколов . . . 200

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Богомолова	C.A.,	Муравьева	и.в.	Процессы	метрологического	
обеспечения сборочного производства						
Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Матросов А.Е. Обоснование предельной						
частоты враш	цения ші	тинделя в мом	иент за	тяжки для и	сключения случаев	
повреждения	резьбы	отверстия на с	собирає	емом узле .		208

Thoulio II cmaava o mallilluav II movauliamav

	- r		• • • • • • • • • • • • • • • • • • • •						
Эрлих	Б.М. Ме	етодика	активног	о гашен	ия и	воз	буждения	колебаний	
с учето	м запаздь	ывания уі	правляю	цего возд	цейств	ВИЯ			210
Петров	А.Н., Ло	гинов Б.	А., Петр	ов М.А.,	Поно	мар	ев С.Г., Ло	гинов А.Б.	
Исслед	ование с	мазочны	х матері	иалов на	ОСНО	ве	коллоидно	го графита	
и дис	ульфида	молибд	дена, и	спользуе	мых	В	процессах	горячего	
пофоры	иировация	п стапай	и сппаво	ND.					21/

В помощь конструктору, технологу

Гимадеев М.Р., Давыдов В.М. Корреляционные связи показателеи
шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом 219
Задорина Н.А., Непомилуев В.В., Олейникова Е.В. Индивидуальный
подбор деталей при сборке как альтернатива необходимости повышения
точности их обработки
Меделяев И.А., Спирягин В.В., Кончаков Н.И., Кобзев И.В. Численное
моделирование процесса деформации теплообменных труб под
действием внешней распределенной нагрузки
Бойко М.В., Сычев А.П., Колесников И.В., Ермаков С.Ф., Шершнев Е.Б.
Влияние эфиров холестерина на процессы формирования поверхностных
антифрикционных пленок

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — 84967) или непосредственно в издательстве

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.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

В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

Редакционный совет

MOCKBA

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф. В.В. БАРДУШКИН, д.ф.-м.н. И.А. БУЯНОВСКИЙ, д.т.н., проф. М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф. А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф.

С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н. И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц. Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н. А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц. Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н. А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф. И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н.

Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф. А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н.КУЛЬЧИН, акад. РАН А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф. В.И. ЛЫСАК, акад. РАН В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК

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

KAZAHL

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

KOBPOB

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-HA-AMYPE

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

нижний новгород

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

POCTOB-HA-DOHY

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

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

CAMAPA

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

CAHKT-NFTFP6VPF

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

TOMCK

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

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

XAFAPORCK

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

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

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

KNEB

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

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

THE MONTHLY **JOURNAL FOR SCIENTISTS** AND MANUFACTURERS



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAK

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.00 - MECHANIC. 05.02.00 - MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE, 05.04.00 - POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING, 05.05.00 — TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MECHANICAL ENGINEERING

Vol. 20 2019 5 (226)

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Dubovik E.A. The adaptability design of the actuator test stand transfer boxes

Assembly welding works. Soldering Bykh O.A., Vytnov Yu.V., Aleksandrin A.G., Solovyev D.V., Golubev S.V., Gerasimov E.A., Bushmelev I.S. Welding process automation during repair Quality assurance. Testing. Monitoring Bogomolova S.A., Murav'eva I.V. Processes of assembly production metro-Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Matrosov A.E. Justification of the maximum speed of the spindle at the time of tightening to avoid damage to the thread Friction & lubrication in machines and mechanisms **Erlich B.M.** The methods of active damping and excitation of oscillations taking into account delay of the managing director of influence Petrov A.N., Loginov B.A., Petrov M.A., Ponomaryov S.G., Loginov A.B. Research into lubrication materials contain colloidal-graphite and disulfide Industrial and design engineer's aid Gimadeev M.R., Davydov V.M. Correlation of the roughness parameters Zadorina N.A., Nepomiluev V.V., Oleynikova E.V. Individual selection of parts during assembly as an alternative to the need to improve the accuracy of their

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — 84967) or directly in editorial of the journal. Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

Medeljaev I.A., Spiryagin V.V., Konchakov N.I., Kobzev I.V. Numerical

Boiko M.V., Sychev A.P., Kolesnikov I.V., Ermakov S.F., Shershnev E.B.

modeling of heat exchange tube deformation under external load distribution 231

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www. mashin.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 V.I. KOLESNIKOV

Editors

MOSCOW A.S. VASIL'EV

(Chief editor) V.V. BARDUSHKIN I.A. BUYANOVSKY M.V. VARTANOV A.A. GUSEV S.M. ZAKHAROV

I.N. ZININA

Regional editors

VLADIVOSTOK

Yu.N.KULSHIN A.A. SUPONIA VOLGOGRAD

M.G. KRISTAL

V.I. LYSAK V.M. TRUKHANOV

IZHEVSK

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

KAZAN

R.I. ADGAMOV

KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN A.M. SHPILEV

NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

OREL

Yu.S. STEPANOV G.A. KHARLAMOV

ORENBURG

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

PFRM

S.M. BELOBORODOV V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON

A.A. RYZHKIN

B.V. SHANDROV A.G. KHOLODKOVA

Yu.L.IVANOV

A.V. IGNATOV Yu.G.KOZYREV A.I. KUMENKO I.A. LUBININ

RYBINSK

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

SAMARA

YILA VASHUKOV M A FVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG

E.V. SHALOBAEV TOMSK

A.V. KOLUBAEV

V.E. PANIN TULA

A.A. MALIKOV V.V. PREYS KHABAROVSK

V.I. SCHPORT Belarus

MINSK

V.L. BASINJUK M.L KHEIFETZ

GOMEL V.E. STARZHINSKI

Ukraine KIEV

A.S. ZENKIN V.A. MATVIENKO

DONETSK

A.N. MIKHAILOV

Poland

P. LEBKOVSKI E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:

E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

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

ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ КОНСТРУКЦИИ

УДК 656.13:05.22.10

Е.А. Дубовик (Донской государственный технический университет,

г. Ростов-на-Дону)

E-mail: Dubovik1982@list.ru

Технологичность конструкции привода стенда для испытания раздаточных коробок перемены передач грузовых автомобилей

Проведены кинематический и силовой расчеты привода стенда для испытания раздаточных коробок перемены передач грузовых автомобилей, позволяющие снизить энергопотребление стенда.

Proposes a kinematic and power calculation of the drive stand for testing the transfer gearboxes of trucks, which allows to reduce the energy consumption of the stand.

Ключевые слова: автомобиль, расчет, стенд, привод.

Keywords: car, calculation, stand, drive.

На агрегатном участке автотранспортного предприятия (АТП) предполагается использование стенда для испытания раздаточных коробок грузовых автомобилей ГАЗ, КамАЗ, КрАЗ, Урал (рис. 1). Для различных классов автомобилей в целях унификации параметров разработана методика расчета, мощности при-

вода, муфт, параметров карданных валов и др. Технология решения поставленной задачи включает несколько этапов.

В ходе модернизации необходимо провести кинематический и силовой расчет привода стенда, осуществить подбор электродвигателя 2, муфты 3, определить параметры карданных валов 5 и 7.

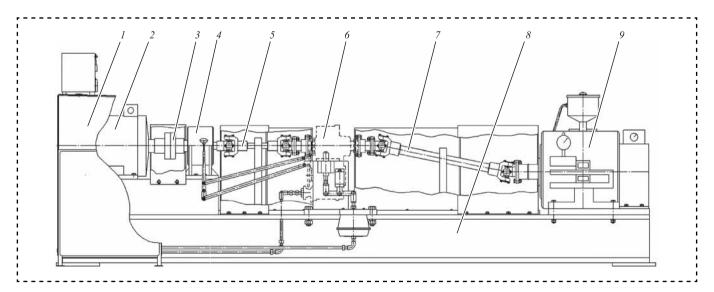


Рис. 1. Стенд для испытания раздаточных коробок грузовых автомобилей:

1- пульт управления; 2- электродвигатель; 3- муфта; 4- опора промежуточная; $5,\ 7-$ карданные валы; 6- испытываемая раздаточная коробка; 8- рама; 9- нагрузочное устройство



Согласно техническим условиям на капитальный ремонт автомобилей ЗИЛ-130 испытание раздаточных коробок производится при частоте вращения входного вала моста n_{Δ} и подводимой мощности *N*. Исходя из этих условий, определим мощности на валах привода стенда:

$$\begin{split} N_3 &= \frac{N_4}{\eta_{\kappa,\Pi}};\\ N_2 &= \frac{N_3}{\eta_{\kappa,\Pi}};\\ N_1 &= \frac{N_2}{\eta_{\rm M}}, \end{split} \tag{1}$$

где $\eta_{\kappa.\pi}$ — коэффициент полезного действия шарнира карданной передачи;

 $\eta_{\scriptscriptstyle M}$ — коэффициент полезного действия муфты. Частота вращения вала двигателя: $n_1 = n_2 = n_3 = n_4 = 1500$ мин⁻¹ (рис. 2).

По ГОСТ 19523—81 выбираем электродвигатель мощностью $N_{\rm дв} \ge N_1$ с частотой вращения, близкой к n_1 . Этим условиям удовлетворяет двигатель RAM180L4 мощностью 22 кВт и частотой вращения вала $n_1 = 1460 \text{ мин}^{-1}$.

Определим мощности на остальных валах привода стенда:

$$N_4 = N_3 \eta_{\rm p.k};$$

 $N_5 = N_4 \eta_{\rm K.II};$ (2)
 $N_6 = N_5 \eta_{\rm K.II},$

где $\eta_{\text{p.k}}$ — КПД испытываемой раздаточной коробки перемены передач.

Определим крутящие моменты на валах привода стенда:

$$T_i = 9556 \frac{N_i}{n_i},$$

где T_i — крутящий момент на i-м валу, $\mathbf{H} \cdot \mathbf{m}$; N_i — мощность на i-м валу, кВт;

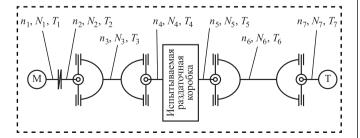


Рис. 2. Кинематическая схема привода стенда для испытания раздаточных коробок грузовых автомобилей

 n_i — частота вращения i-го вала, мин⁻¹.

Найдем передаточное число раздаточной коробки на пониженной передаче $u_{\rm p, K}$ из вы-

ражения
$$n_4 = n_5 = n_6 = \frac{n_3}{u_{\text{p.K}}}$$
.

В модернизируемом стенде применяют два карданных вала: первичный — для передачи крутящего момента от приводного электродвигателя к испытываемой раздаточной коробке; вторичный — для передачи крутящего момента от коробки к тормозному устройству. Для изменения длины валов их изготавливают из полой втулки и самого вала, соединенных между собой посредством шлицевого соединения.

Расчет вала

В ходе расчета карданной передачи необходимо определить параметры вала и втулки, а также шлицевого соединения. Детали изготовлены из стали 45 ГОСТ 1050—2013 с закалкой наружной поверхности шлицев до 40...42 HRC. Исходные данные для расчета вала: крутящий момент $T_{\rm KD}$ и силы, действующие на вал F_{t} , F_{r} , F_{x} . Так как в карданных передачах валы работают только на кручение, то радиальные и осевые силы равны нулю: $F_t = F_r = F_x = 0.$

Определим наружный диаметр вала D_1 из условия прочности на кручение:

$$\tau_{\rm kp} = \frac{T_{\rm kp} \cdot 10^3}{W_{\rm o}} \leqslant \left[\tau_{\rm kp}\right],$$

где $T_{\rm Kp} = T_3;$ $W_{
m p} = {
m полярный \ \, момент \ \, coпротивления}$ вала, $W_{\rho} = \frac{\pi D_1^3}{16}$.

 $[\tau_{\kappa p}]$ — допускаемое напряжение материала вала на кручение.

Тогда

$$D_1 = \sqrt[3]{\frac{16T_{\rm kp} \cdot 10^3}{\pi \lceil \tau_{\rm kp} \rceil}}.$$

С точки зрения технологичности изготовления шлицев на внутренней поверхности сопрягаемой втулки, ее внутренний диаметр должен быть не менее 32 мм. Данному значению внутреннего диаметра втулки соответствует шлицевое соединение с наружным диаметром шлицев 36 мм. Следовательно, предварительно наружный диаметр вала примем $D_1 = 36$ мм.



Расчет шлицевого соединения передачи

Расчет шлицевых соединений с прямобочными шлицами является проверочным на смятие рабочих граней шлицев и на износ:

$$\sigma_{_{\mathrm{CM}}} = \frac{T_{_{\mathrm{III}}} \cdot 10^3}{S_{_F} l} \leqslant [\sigma_{_{\mathrm{CM}}}];$$

$$\sigma_{\scriptscriptstyle{\text{\tiny M3H}}} = \frac{T_{\scriptscriptstyle{\text{\tiny III}}} \cdot 10^3}{S_F l} \, \leqslant \, \left[\sigma_{\scriptscriptstyle{\text{\tiny M3H}}}\right],$$

где $T_{\rm m}$ — расчетный крутящий момент, передаваемый шлицевым соединением;

 S_F — удельный суммарный статический момент площади рабочих поверхностей соединения относительно оси вала;

l — рабочая длина шлицев;

 $[\sigma_{cm}]$ — допускаемое напряжение на смятие; $[\sigma_{uзн}]$ — допускаемое напряжение на износ. Откуда

$$T_{\text{III}} = kT_3$$

где k — коэффициент режима работы;

 T_3 — номинальный крутящий момент, передаваемый соединением при установившемся режиме работы.

Допускаемое среднее давление из расчета на износ равно $[\sigma_{\text{изн}}] = 0.6$ HRC.

Расчет втулки

Предварительно внутренний диаметр втулки примем равным d_2 , для изготовления выбираем по ГОСТ 8734—87 трубу 40×4 из стали 45 ГОСТ 1050—2013.

Определим полярный момент сопротивления выбранной тубы:

$$W_{\rho} = \frac{\pi \left(D_2^4 - d_2^4\right)}{16D_2},$$

где D_2 — наружный диаметр втулки;

 d_2 — расчетный внутренний диаметр втулки.

Так как на внутренней поверхности втулки будут нарезаться шлицы, то в качестве расчетного внутреннего диаметра втулки примем наружный диаметр шлицев.

Определим напряжение кручения во втулке:

$$\tau_{\rm Kp} = \frac{T_{\rm Kp} \cdot 10^3}{W_0}.$$

Сравним полученное значение с допустимым по формуле:

$$\tau_{Kp} \leq [\tau_{Kp}].$$

Окончательно принимаем наружный диаметр вала равным D_1 , наружный диаметр втулки — D_2 , внутренний диаметр втулки — d_2 , шлицевое соединение — $d8 \times 32 \times 36 \times 6$.

Расчет вторичной карданной передачи

Вал изготовлен из стали 45 ГОСТ 1050—2013 с закалкой наружной поверхности шлицев до 40...42 HRC.

Определим наружный диаметр вала D_1 из условия прочности на кручение:

$$\tau_{\mathrm{KP}} = \frac{T_{\mathrm{KP}} \cdot 10^3}{W_{\mathrm{o}}} \leqslant \left[\tau_{\mathrm{KP}}\right],$$

где $T_{KD} = T_6$;

$$W_{\rho} = \frac{\pi D_1^3}{16}.$$

В соответствии с технологичностью изготовления шлицев на внутренней поверхности сопрягаемой втулки ее внутренний диаметр предварительно принимаем равным 32 мм. Данному значению внутреннего диаметра втулки соответствует шлицевое соединение с наружным диаметром шлицев 36 мм. Следовательно, предварительно наружный диаметр вала принимаем равным D_1 .

Проведем проверочный расчет шлицевого соединения передачи на смятие рабочих граней шлицев и на износ.

- по ГОСТ 1139—80 для выбранного шлицевого соединения определяем S_F , мм;
- принимаем длину шлицевого соединения l, мм;

$$\sigma_{\rm cm} = \frac{T_{\rm III} \cdot 10^3}{S_F l} \leq [\sigma_{\rm cm}];$$

$$\sigma_{\text{изн}} = \frac{T_{\text{III}} \cdot 10^3}{S_F l} \le \left[\sigma_{\text{изн}}\right];$$

$$T_{\text{III}} = kT_6;$$

$$[\sigma_{_{\rm ИЗH}}] = 0.6$$
 HRC.



Расчет крестовин первичного карданного вала

Крестовина служит для передачи крутящего момента от вилки-фланца к вилке карданной передачи на входе и от вилки к вилке-фланцу карданной передачи на выходе. Ввиду незначительной разницы передаваемых крутящих моментов шарнирами на входе и на выходе карданного вала для уменьшения номенклатуры изготавливаемых деталей применяют на обоих концах вала одинаковые вилки и крестовины.

Крестовины изготавливали из стали 35Л ГОСТ 977—88.

В шейках крестовины передаваемый крутящий момент вызывает деформацию сдвига (среза) и деформацию смятия. Обычно сопротивление стали деформации сдвига ниже, чем среза. Поэтому последней пренебрегают и шейки крестовины рассчитывают только на срез.

Определяем расчетный крутящий момент [1]:

$$T_{\rm p} = kT_2$$

где T_2 — крутящий момент, передаваемый вилкой.

Из условия прочности на срез имеем:

$$\tau_{\rm cp} = \frac{4F_{\rm cp}}{\pi (d^2 - d'^2)} \leqslant \left[\tau_{\rm cp}\right],$$

где
$$F_{\rm cp}$$
 — сила среза, $F_{\rm cp} = \frac{T_{\rm p} 10^3}{ne}$;

n — число шеек, передающих крутящий момент:

е — плечо максимального действия силы относительно осевой линии крестовины;

d — наружный диаметр шейки крестовины,

$$d = \sqrt{\frac{4F_{\rm cp}}{\pi \left[\tau_{\rm cp}\right]} + d'^2};$$

d' — диаметр отверстия полости для смазки в шейке крестовины;

 $[au_{cp}]$ — допускаемое напряжение среза материала крестовины, $[au_{cp}] = 0.3 \ \sigma_{T};$

 $\sigma_{\!\scriptscriptstyle T}$ — предел текучести материала болта.

Для сохранения прочности шейки крестовины толщину стенки находим из условия $\delta = 0.5 \ (d - d') \ge 5$.

Тогда диаметр шейки:

$$d = d' + 2 \delta$$
.

Расчет крестовин вторичного карданного вала

Расчетный крутящий момент вычисляем по формуле:

$$T_{\rm p} = kT_{\rm 5}$$

где T_5 — крутящий момент на выходном валу раздаточной коробки.

Определим силу среза по формуле:

$$F_{\rm cp} = \frac{T_{\rm p} \cdot 10^3}{ne}.$$

Принимаем диаметр отверстия полости для смазки в шейке крестовины d'.

Диаметр шейки крестовины из условия сохранения прочности стенки:

$$d = d' + 2\delta$$
.

Расчет фланцевых соединений

Фланцевое соединение (ГОСТ 20761—75) один из наиболее распространенных типов жестких муфт, разъемных в плоскости, перпендикулярной к оси вала. В приводе модернизируемого стенда применяли несколько фланцевых соединений: на выходе первичного карданного вала — для соединения вилки с переходным фланцем, соединяемым с входным валом испытываемой раздаточной коробки; на входе вторичного карданного вала — для соединения вилки карданной передачи с переходным фланцем, соединяемым с выходным валом испытываемой раздаточной коробки; на выходе вторичного карданного вала — для соединения вилки с валом нагрузочного тормоза. Передача крутящего момента осуществляется силами трения, возникающими на стыке полумуфт от затяжки болтов и непосредственно болтами, которые работают на срез и смятие. Расчет фланцевого соединения заключается в проверочном расчете на прочность соединяющих болтов. Ввиду незначительной разницы передаваемых крутящих моментов на разных концах вторичного карданного вала на обоих концах целесообразно применение одинаковых фланцевых соединений.



Расчет фланцевого соединения первичного карданного вала

Определяем расчетный крутящий момент, передаваемый соединением по формуле:

$$T_{\rm p} = kT_4$$

где T_4 — крутящий момент на входном валу испытываемой раздаточной коробки;

k — коэффициент динамичности.

В болтах крутящий изгибающий момент вызывает деформацию сдвига (среза) по двум плоскостям и деформацию смятия. Обычно сопротивление стали деформации сдвига ниже, чем среза. Поэтому последней пренебрегают и ось рассчитывают только на срез. Материал изготовления болтов — сталь 35.

Проведем расчет болтов из условия прочности на срез:

$$\tau_{\rm cp} = \frac{4F_{\rm cp}}{\pi n d_6^2} \leqslant \left[\tau_{\rm cp}\right],$$

где $F_{\rm cp}$ — сила среза, $F_{\rm cp} = \frac{2 \cdot 10^3 T_{\rm p}}{D_{\rm 6}};$ $D_{\rm 6}$ — диаметр расположения болтов;

n — число болтов в соединении;

 $d_{\rm 6}$ — диаметр болта по внутреннему сечению резьбы;

 $[\tau_{cp}]$ — допускаемое напряжение на срез материала болта, $[\tau_{cp}] = 0.3 \, \sigma_{T};$

 σ_{T} — предел текучести материала болта.

Расчет фланцевых соединений вторичного карданного вала

Расчет проводится для той части вала, передаваемый крутящий момент на которой больше.

Определим расчетный крутящий момент:

$$T_{\rm p}=kT_{\rm 5},$$

где T_5 — крутящий момент на выходном валу испытываемой раздаточной коробки.

Проведем расчет болтов из условия прочности на срез:

$$\tau_{\rm cp} = \frac{4F_{\rm cp}}{\pi n d_6^2} \leqslant \left[\tau_{\rm cp}\right].$$

Безотказность (поток отказов P) работы стенда и любого его элемента определяется законом нормального распределения и зависит от двух составляющих — интенсивности λ потока отказов и наработки t:

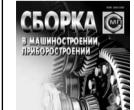
$$P = \exp^{(-\lambda t)}$$
.

Библиографический список

1. Андросов А.А., Спиченков В.В., Андрющенко Ю.Е. Основы конструирования машин: учебное пособие. Ростов н/Д.: ДГТУ, 1993. 152 с.







ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ. ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: 8 (495) 785-60-69

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ. ПАЙКА

УДК 621.039.533

О.А. Бых, канд. техн. наук, Ю.В. Вытнов, А.Г. Александрин, Д.В. Соловьев, С.В. Голубев,

Е.А. Герасимов, канд. техн. наук (АО "ОКБМ Африкантов", г. Нижний Новгород),

И.С. Бушмелев (ОАО "НИТИ Прогресс", г. Ижевск)

E-mail: golubevsv@okbm.nnov.ru

Автоматизация процесса сварки при ремонте парогенераторов реакторных установок атомных ледоколов

Рассмотрена возможность применения автоматической сварки для ремонта парогенераторов атомных ледоколов. Разработаны специализированное сварочное оборудование и технология ремонта путем глушения негерметичных модулей парогенератора и сварки заглушки в условиях ограниченного доступа и радиационного излучения.

The possibility of using automatic welding application for repair of nuclear icebreaker steam generators is considered. Specialized welding equipment and repair technology have been developed by killing the leaking steam generator module and welding of the plug under the conditions of limited access and radiation.

Ключевые слова: автоматическая аргонодуговая сварка, парогенератор, атомный ледокол.

Keywords: automatic argon-arc welding, steam generator, nuclear icebreaker.

Один из важнейших узлов реакторных установок атомных ледоколов — парогенератор.

За время длительной эксплуатации атомных ледоколов в трубках парогенераторов развиваются дефекты, приводящие к межконтурным неплотностям и утечке теплоносителя 1-го контура.

При возникновении неплотности требуется глушение негерметичного модуля, для которого необходимо выполнить сварку заглушек на глубине до 340 мм в условиях ограниченного доступа и радиационной обстановки. Выполнение сварки ручным способом в данных условиях невозможно.

Серийное сварочное оборудование не позволяет выполнять ремонт неплотных модулей парогенераторов ввиду отсутствия малогабаритных сварочных головок с системой видеонаблюдения для точной настройки на стык в условиях ограниченного доступа.

В связи с этим потребовалось создать специализированное сварочное оборудование для выполнения данного ремонта, а также разработать технологию ремонта неплотных модулей парогенераторов.

В соответствии с техническим заданием АО "ОКБМ Африкантов" предприятие ОАО "НИТИ Прогресс" разработало и изготовило специализированную установку автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся электродом "Прогресс-10" для глушения неплотных модулей парогенераторов (рис. 1). Сварочный автомат "Прогресс-10" обеспечи-

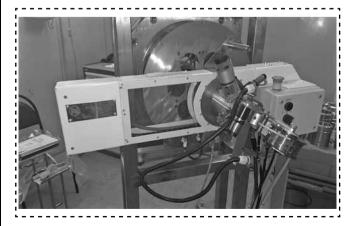


Рис. 1. Сварочный автомат "Прогресс-10", установленный в макет-имитатор свариваемого изделия



вает выполнение кольцевых швов приварки заглушек диаметром до 60 мм на глубине до 340 мм в условиях ограниченного доступа и радиационной обстановки.

В состав сварочного автомата входят следующие основные узлы и механизмы:

- сварочная головка;
- система видеонаблюдения за процессом сварки:
 - система управления процессом сварки;
 - источник питания сварочной дуги;
 - система подвода защитного газа;
- центратор (платформа) для базирования сварочной головки;
 - макет-имитатор свариваемого изделия.

Система видеонаблюдения позволяет определять положение сварочного электрода относительно свариваемого стыка и наблюдать за процессом сварки в условиях ограниченного доступа и отсутствия прямой видимости зоны сварки. Система управления сварочного автомата изготовлена на базе промышленного контроллера и обеспечивает настроечные и технологические перемещения сварочной горелки в процессе работы, задание и поддержание параметров режима сварки (сварочный ток, скорость сварки, длина дугового промежутка, скорость подачи присадочной проволоки), а также их изменение в процессе сварки. Для базирования сварочной головки применяется специальная платформа (центратор).



Рис. 2. Сварное соединение

Макет-имитатор свариваемого изделия используют для отработки режимов сварки.

Сварку выполняют в вертикальном положении, неплавящимся электродом в несколько проходов с применением импульсного режима сварочного тока и импульсной подачи сварочной проволоки марки Св-04X19H11M3 диаметром 0,8 мм. Сварные швы подвергают послойному визуальному контролю (рис. 2).

Применение сварочного автомата "Прогресс-10" при ремонте парогенераторов РУ атомных ледоколов позволит решить проблему герметизации неплотных модулей парогенератора.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

УДК 658.562

С.А. Богомолова, И.В. Муравьева, канд-ты техн. наук ("Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС", Москва) E-mail: iravm@bk.ru

Процессы метрологического обеспечения сборочного производства

Представлены вопросы и процессы метрологического обеспечения и измерений при сборке. На примере измерений линейных размеров и наружного диаметра вала рассмотрен выбор методов и средств измерений с учетом характеристики реальных условий, в которых будут выполняться измерения, и с использованием характеристик погрешности. Найдя по известному допуску и номинальному размеру допускаемые погрешности измерения для наружного диаметра вала и внутреннего диаметра отверстия втулки, можно выбрать конкретные средства измерений, которые будут использованы в сборочном производстве.

Questions and processes of metrological support and measurements at assembly are presented. On the example of measurements of the linear sizes and outer diameter of a shaft the choice of methods and measuring instruments taking into account characteristic of real conditions in which measurements, and with use of characteristics of an error will be carried out is considered. Having found on the known admission and the nominal size the allowed measurement errors for the outer diameter of a shaft and for the internal diameter of an opening of the plug, it is possible to choose concrete measuring instruments which will be used in assembly production.

Ключевые слова: метрологическое обеспечение, сборочное производство, средство измерения, погрешность, проектирование и разработка процессов.

Keywords: measurement assurance, assembly production, measuring instrument, error, design and development of processes.

Введение

Организационная основа метрологического обеспечения — метрологическая служба организации [1], которая на сборочном производстве преследует цель удовлетворения метрологических потребностей сборочных технологий, неразрывно связанных с измерениями, например, в производстве приборов и оборудования для радиографического контроля (дефектоскопов), и/или всего предприятия в целом [2]. Любая заготовка, деталь или сборочная единица обладает множеством свойств. Например, стальной вал можно охарактеризовать по его протяженности в пространстве, степени нагретости, инерционности и т.д. В целях количественной оценки определенного свойства объекта и выполняют измерение, т.е. реализуют процесс экспериментального получения одного или более значений величины, которые могут быть обоснованно приписаны величине. При этом очень важно *оценить погрешность измерений* в условиях воспроизводимости [3].

Измерения принято классифицировать, например, в зависимости от способа получения результата измерения различают прямые и косвенные. Прямое измерение — это измерение, при котором искомое значение величины получают непосредственно от средства измерений (измерение диаметра цилиндрической детали микрометром). Косвенное измерение — это измерение, при котором искомое значение величины определяют на основании результатов прямых измерений других величин, функционально связанных с искомой величиной [4] (определение объема цилиндрической детали по результатам прямых измерений диаметра и



длины детали, связанных с объемом известной математической зависимостью). В зависимости от числа повторений, выполняемых для получения результата, различают измерения с однократным и многократным повторениями — не менее четырех результатов.

Основная цель выполнения измерения величины состоит в получении результата измерения. Результат измерения величины — множество значений, приписываемых измеряемой величине вместе с любой другой доступной и существенной информацией. Как правило, информация относится к точности измерения и выражается показателями точности. Нормативными правовыми актами Российской Федерации в области обеспечения единства измерений предусмотрены требования к показателям точности результатов измерений, относящихся к сфере государственного регулирования обеспечения единства измерений: "результаты измерений должны быть выражены в допущенных к применению в Российской Федерации единицах величин, а показатели точности измерений не должны выходить за установленные границы" [5]. Показатель точности измерений — установленная характеристика точности любого результата измерений, полученного при соблюдении требований и правил данной методики измерений [6, 7].

Погрешность измерения представляет собой разность между результатом измерения и действительным (опорным) значением величины. В зависимости от характера проявления различают случайные, систематические, грубые погрешности (промахи). Случайная погрешность измерения — составляющая погрешности измерения, изменяющаяся случайным образом (по знаку и значению) при повторных измерениях одной и той же величины, проведенных с одинаковой тщательностью. Случайное изменение влияющих на результаты измерений факторов (например, условий измерений) вызывает рассеяние результатов измерений. В качестве основной числовой характеристики случайного рассеяния результатов измерений принята дисперсия $D = \sigma^2$ или стандартное отклонение о. Систематическая погрешность измерения — составляющая погрешности измерения, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. В некоторых случаях возможно исключение систематичной погрешности путем введения поправки. Например, при калибровке рабочего средства измерения по эталону. Однако в таком случае остается составляющая, обусловленная оцениванием систематической погрешности, а также систематические погрешности, на которые поправки не были введены — неисключенные систематические погрешности. Грубая погрешность измерения — погрешность измерения, существенно превышающая зависящие от объективных условий измерений значения систематической и случайной погрешности. Например, грубая погрешность может быть вызвана критическим изменением значения параметра, характеризующего условия измерений, или ошибкой оператора [3, 4].

Наиболее широкое применение на территории Российской Федерации имеют характеристики погрешности, которые выражают разброс значений, приписываемых измеряемой величине на основе используемой информации. Статистические оценки характеристик погрешности измерений отражают близость отдельного, экспериментально полученного результата измерений к опорному значению измеряемой величины [3, 4].

Нормы характеристик погрешностей, установленные для диапазона измерений, используют в качестве исходной информации при выборе методов и средств измерений величин различного рода. Поэтому в целях улучшения метрологического обеспечения сборочного производства решали задачу: уточнить разработку процессов метрологического обеспечения сборочного производства.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Под методом измерений понимают прием или совокупность приемов сравнения измеряемой величины с ее единицей или соотнесения со шкалой в соответствии с реализованным принципом измерений. В условиях сборочного производства наиболее широко применяют метод непосредственной оценки, при котором значение измеряемой величины определяют по шкале отсчетного устройства. При методе сравнения с мерой измеряемую величину сравнивают с величиной, воспроизводимой мерой (рисунок). Пример нулевого метода — измерение электрического сопро-





Классификация методов измерений

тивления мостом с полным его уравновешиванием. Методы измерений замещением и дополнением свидетельствуют об особенностях методики измерений с позиций взаимодействия мер и прибора сравнения и могут быть реализованы, например, при измерении массы путем взвешивания на весах. В качестве примера реализации дифференциального метода измерений можно рассматривать измерения диаметра цилиндрической детали индикаторным нутромером, предварительно настроенным на размер с помощью концевых мер длины или калибровочных колец [8].

Проектирование и разработку процессов метрологического обеспечения сборочного производства целесообразно начинать с выбора процессов измерений. Для этого потребуется определить состав жизненного цикла продукции сборочного производства, характер деятельности, соответствующий каждому этапу жизненного цикла, и контрольные точки для мониторинга [8].

В целях реализации метода измерений используют такие средства измерений, для которых нормированы метрологические характеристики. Под метрологическими характеристиками средства измерений понимают характеристики свойств средства измерений, оказывающие влияние на результаты и погрешности измерений, предназначенные для оценки технического уровня и качества средства измерений, определения результатов измерений и расчетной оценки характеристик

инструментальной составляющей погрешности измерений. Информацию о метрологических характеристиках средства измерений указывают в нормативной документации (например, паспорте на средство измерений). К числу метрологических характеристик относят:

- функцию преобразования;
- диапазон измерений;
- цену делений шкалы;
- характеристики погрешности;
- характеристики чувствительности средств измерений к влияющим величинам и др. [9].

При выборе средств измерений учитывают класс точности средства измерений — обобщенную характеристику, выражаемую абсолютной, относительной или приведенной погрешностью средства измерений.

Выбор методов и средств измерений в процессе проектирования и разработки процессов метрологического обеспечения сборочного производства осуществляют на основании следующих задаваемых исходных данных:

- вида и описания всех объектов измерений, свойств объекта, которые должны быть определены в соответствии с поставленной задачей измерений, а также других свойств объектов измерений, способных влиять на погрешности измерений;
- вида измеряемой величины, диапазона ее возможных значений;
- характеристики внешних условий проведения измерений в зависимости от того, где будет осуществляться сборка, и режимов работы объектов измерений, способных влиять на погрешности измерений;
- пределов допускаемых характеристик погрешности измерений, которым должны удовлетворять результаты измерений (требования к погрешностям в заданных условиях).

Конкретизация задаваемых исходных данных существенно влияет на близость расчетных значений характеристик погрешности измерений к действительным характеристикам погрешности измерений.

Выбор методов и средств измерений по заданным исходным данным — многовариантная задача, приемлемое метрологическое решение которой может быть получено при разных соотношениях составляющих погрешности измерений. Рациональным считается такое решение данной задачи, при котором минимизируются затраты на измерения



(в том числе, на метрологическое обслуживание средств измерений) при условии обеспечения заданных пределов допускаемых характеристик погрешности измерений в заданных условиях с учетом всех, не только метрологических, требований.

Поэтому в процедуру выбора методов и средств измерений в процессе проектирования и разработки процессов метрологического обеспечения сборочного производства рекомендуется включить предварительный выбор методов и средств измерений, который результативнее осуществлять в следующей последовательности:

- на основании исходных данных установить вид измерений для определения значений измеряемой величины сборочной единицы: прямые или косвенные;
- на основании обзора существующих видов современных средств измерений, которые предположительно смогли бы применяться в контроле сборочного производства, установить, необходимо ли использовать вторичный процесс и его информативный параметр, отражающий искомое свойство объекта прямых измерений;
- установить виды и типы используемых средств измерений, а также других технических средств, таких, например, как вспомогательные источники энергии, средства автоматизации, средства вычислительной техники и т.д., участвующих в процессе сборки.

На данном этапе предварительный выбор типов средств измерений основывается на комплексе нормированных для них метрологических характеристик в соответствии с ГОСТ 8.009—84, других технических характеристик, рабочих условий применения типов средств измерений [9]:

- проводят ориентировочный расчет погрешностей средств измерений в реальных для конкретного сборочного производства условиях применения;
- составляют схему соединений средств измерений с объектом измерений сборочными единицами, между собой (если их несколько), с другими техническими средствами;
- предварительно устанавливают число измерений (наблюдений) и соответствующий алгоритм обработки их отдельных результатов, если предполагается, что для удовлетворения требований к погрешности методики

измерений необходимо будет при измерениях уменьшать влияние случайных составляющих погрешности измерений;

— выбирают методику исключения (уменьшения) систематических составляющих погрешности, если предполагается, что для удовлетворения требований к погрешности методики измерений необходимо будет при измерениях уменьшать систематические составляющие погрешности измерений.

При расчете характеристик погрешности прямых измерений необходимо выделить следующие составляющие погрешности: метода измерений; инструментальную; субъективную.

Погрешность метода измерений обусловлена несовершенством принятого метода измерений, в том числе различием между принятой моделью объекта измерений и неизвестной моделью, которая адекватно отражала бы свойства объекта измерений [4]. Например, при планировании измерений внутреннего диаметра отверстия тонкостенной цилиндрической детали принятая модель измеряемой поверхности и измеряемой величины — в виде прямого кругового цилиндра и диаметра цилиндра в любом его поперечном сечении при любой угловой координате — будет являться источником методической погрешности, так как в действительности внутренняя поверхность тонкостенной цилиндрической детали представляет собой несколько отличающийся от прямого кругового цилиндра усеченный эллиптический конус с разностенностью [8].

Инструментальная погрешность измерения включает составляющие погрешности измерений взаимодействия средств измерений с объектом измерений и конечной пространственной разрешающей способностью средств измерений [4].

Субъективная погрешность вызвана погрешностью отсчета оператором показаний по шкалам измерительных приборов, по диаграммам регистрирующих приборов и т.п. [2, 7].

Расчет характеристик погрешности прямых измерений проводят в следующей последовательности:

- определяют по отдельности значения методической, инструментальной, субъективной составляющих погрешности;
- суммируют значения всех составляющих погрешности (выполняют геометрическое суммирование при отсутствии корреляции



между отдельными составляющими погрешности).

При расчете характеристик погрешности косвенных измерений на основе выбранной процедуры и технических средств методики измерений следует учитывать, кроме погрешностей прямых измерений, по результатам которых вычисляют результаты косвенных измерений, также методические погрешности косвенных измерений и возможную корреляцию погрешностей прямых измерений.

В процессе сравнения характеристик погрешностей измерений с заданными пределами допускаемых характеристик погрешностей измерений можно выделить четыре случая (таблица).

В целях уменьшения значений характеристик погрешности измерений могут быть реализованы способы повышения точности измерений [7]. При соотношении характеристики погрешности измерений 20...60 % от предела допускаемых значений выбор методов и средств измерений можно считать законченным при удовлетворении всех остальных требований.

Средства измерений линейных размеров выбирают в зависимости от допуска контролируемого изделия и допускаемой погрешности измерений. Под "допуском на размер" понимают разность между наибольшим и наименьшим предельным размером. Допуск на размер — определяющая характеристика для подсчета допускаемой погрешности измерений, которую принимают равной от 1/5 до 1/3 допуска на размер. В допускаемую погрешность измерений входят погрешности средств измерений и установочных мер, условий из-

мерений, базирования изделия, погрешности, вызываемые измерительной силой прибора.

Каждое средство измерений характеризуется основной погрешностью, значение которой указано в паспорте на средство измерений. Сведения о значениях погрешностей измерений средствами измерений (предельные погрешности измерения $\Delta_{\rm пр}$, мкм) приведены в РД 50-98—86 (табл. І и ІІ). В табл. І представлены сведения о погрешностях измерений различными средствами измерений наружных размеров, размеров уступов и величин биения, а в табл. ІІ — сведения о погрешностях измерений внутренних размеров.

Таблицы составлены на основании двух принципиальных положений:

- средством измерений одного типа можно выполнить измерения с различной погрешностью в зависимости от методики и условий выполнения измерения;
- для выбора средств измерений и условий выполнения измерений необходимо оценивать возможные пределы погрешности измерения.

Погрешности средств измерений во многих случаях определяют погрешностью измерения. От правильно выбранного средства измерений зависит обеспечение требуемой точности измерений. Выбор средства измерения заключается в сравнении его основной погрешности с допускаемой погрешностью измерения; при этом основная погрешность средства измерения должна быть меньше допускаемой погрешности измерения.

Рассмотрим выбор методов и средств измерений на примере измерений линейных размеров. Выберем средства измерений наружного диаметра вала с номинальным размером

Варианты соотношения характеристики погрешности измерений и предела допускаемых значений и соответствующие им решения по проекту методики

Соотношение характеристики погрешности измерений и предела допускаемых значений	Решение (рекомендация)
Меньше 20 % от предела допускаемых значений	Рекомендуется введение упрощений в целях обеспечения меньших затрат на реализацию методики измерений при удовлетворении всех прочих требований
2060 % от предела допускаемых значений	Целесообразно принять в качестве окончательной методики измерений
60100 % от предела допускаемых значений	Рекомендуется уменьшение погрешности методики измерений до 5060 % от предела их допускаемых значений
Более 100 % от предела допускаемых значений	Методика измерений требует изменений, обеспечивающих уменьшение характеристик погрешности измерений



30 мм (IT = 21 мкм), внутреннего диаметра отверстия втулки с номинальным размером 46 мм (IT = 25 мкм).

По известному допуску и номинальному размеру находим допускаемые погрешности измерения: для наружного диаметра — $\delta = 6$ мкм, для внутреннего диаметра отверстия втулки — $\delta = 7$ мкм. Для измерения наружного диаметра вала из табл. І РД 50-98—86 выбираем следующие средства измерений:

- 1) микрометр гладкий (МК) с величиной отсчета 0,01 мм при настройке на ноль по установочной мере ($\Delta_{\rm пp}=5$ мкм);
- 2) скоба индикаторная (СИ) с ценой деления $0.01 \text{ мм} \ (\Delta_{\text{пр}} = 5 \text{ мкм});$
- 3) микрометр рычажный (МР и МРИ) с ценой деления 0,002 и 0,01 мм при установке на нуль по установочной мере и скоба рычажная (СР) с ценой деления 0,002 мм при настройке на нуль по концевым мерам длины ($\Delta_{\rm пр} = 4,5$ мкм).

Наиболее дешевым, простым в обращении и надежным в эксплуатации является микрометр гладкий: "Микрометр МК 25-2 ГОСТ 6507—90".

Для измерения внутреннего диаметра отверстия наиболее подходящее средство измерения — нутромер индикаторный (НИ) с ценой деления отсчетного устройства 0,01 мм (табл. II.1 РД 50-98—86): "Нутромер индикаторный НИ-50М-0,01 ГОСТ 868—82".

Заключение

Для правильного определения процессов измерений и метрологического обеспечения сборочного производства целесообразно реко-

мендовать включить предварительный выбор методов и средств измерений в процедуру выбора методов и средств измерений в процессе проектирования и разработки процессов метрологического обеспечения сборочного производства.

Библиографический список

- 1. **ГОСТ Р 8.820—2013. ГСОЕИ.** Метрологическое обеспечение. Основные положения. М.: Стандарт-информ, 2014.
- 2. **Анисимова М.А., Благовещенский Д.И., Нуждин Г.А.** Метрологическое обеспечение производства оборудования неразрушающего контроля // Контроль. Диагностика. 2017. № 7. С. 50—55.
- 3. **Введенский В.Ю., Нуждин Г.А., Соколова Н.А.** Метрология свойств нанокристаллических и аморфных сплавов // Наноинженерия. 2014. № 12. С. 44—48.
- 4. **РМГ 29—2013 ГСИ.** Метрология. Основные термины и определения.
- 5. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений: федер. закон № 102-Ф3 от 26.06.2008 [в редакции 2016 года].
- 6. **ГОСТ 8.010—2013. ГСОЕИ**. Методики выполнения измерений. Основные положения. М.: Стандартинформ, 2014.
- 7. **Введенский В.Ю., Нуждин Г.А.** Повышение качества измерений магнитных свойств нанокристаллических сплавов // Наноинженерия. 2015. № 3. С. 34—38.
- 8. **Трегубов В.И., Благовещенский Д.И., Нуждин Г.А., Ларина М.В.** Метрологический мониторинг изделий, получаемых ротационной вытяжкой // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2017. № 1. С. 193—200.
- 9. **ГОСТ 8.009—84. ГСОЕИ.** Нормируемые метрологические характеристики средств измерений. М.: Стандартинформ, 2004.





УДК 621.757

Ю.3. Житников, д-р техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева),

Б.Ю. Житников, д-р техн. наук (Владимирский юридический институт),

А.Е. Матросов, канд. техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева) E-mail: kgta tms@mail.ru

Обоснование предельной частоты вращения шпинделя в момент затяжки для исключения случаев повреждения резьбы отверстия на собираемом узле

Приведены обоснования частоты вращения шпильки в момент ее затяжки для исключения случая повреждения резьбы отверстия на собираемом узле из-за возникновения значительных моментов сил инерции при затяжке.

The grounds are given for the frequency of rotation of the pin in the moment of its tightening to exclude cases of damage to the thread holes on the collected node due to the occurrence of significant moments of inertia forces when tightening.

Ключевые слова: частота вращения шпинделя, шпильковерт, приведенный момент инерции, момент сил инерции, прочность витков резьбы.

Keywords: spindle rotational speed, stud driver, equivalent moment of inertia, moment due to inertia force, thread strength.

В производстве при механизированном завинчивании и затяжке шпилек имеет место брак в случаях, когда в процессе затяжки на собираемом узле срезается резьба в резьбовом отверстии.

Брак возникает по причине большой частоты вращения шпинделя шпильковерта при неизвестном приведенном моменте инерции вращающихся элементов шпильковерта к оси шпинделя J_z . При больших частотах вращения в момент затяжки (торможения) возникает момент сил инерции, который направлен в сторону вращения, т.е. в сторону затяжки, и может превосходить момент затяжки шпилек в несколько раз.

Момент сил инерции находят из выражения [4]:

$$M^{\rm WH} = J_z \varepsilon,$$
 (1)

где ϵ — угловое замедление (ускорение) в процессе затяжки шпилек.

При затяжке шпильки по сбегу резьбы про-исходит равнозамедленное движение.

Угловое ускорение (замедление) [4]:

$$\varphi = \frac{\varepsilon t^2}{2}; \ \omega_1 = \omega_0 - \varepsilon t, \tag{2}$$

где ϕ — угол поворота шпильки при затяжке; ω_1 , ω_0 — угловая скорость вращения шпильки после затяжки и до затяжки соответственно; t — время затяжки шпильки.

Из выражений (2) угловое ускорение запишется:

$$\varepsilon = \frac{\omega_0^2}{2\varphi}.\tag{3}$$

С учетом выражения (3) момент сил инерции равен:

$$M^{\text{WH}} = J_z \frac{\omega_0^2}{2\omega}.$$
 (4)

Обычно в паспорте шпильковертов не приводятся значения приведенного момента инерции вращающихся элементов шпильковерта к оси шпинделя. Поэтому перед назначением



частоты вращения шпинделя шпильковерта следует рассчитать приведенный момент инерции.

Момент затяжки шпилек при посадке по сбегу резьбы на заходную кромку резьбового отверстия находится из выражения:

$$M'_{3} = M_{\rm p} + M_{\rm n} = (Q + A) \frac{d_{2}}{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho'),$$
 (5)

где O — осевая сила завинчивания, создаваемая силой пружины патрона и весом завинчивающего устройства при вертикальном положении шпильковерта;

A — сила, возникающая при посадке с натягом по резьбовой поверхности отверстия на сбег резьбы шпильки;

 d_2 — средний диаметр резьбы;

 $\psi = \frac{P}{\pi d_2}$ — угол подъема винтовой линии резьбы:

P — шаг резьбы;

ρ — угол трения в резьбе.

С учетом действующих сил и геометрических параметров резьбы выражение (5) примет вид [1]:

$$M_{3}' = \left\{ C_{1} \left(\Delta \lambda_{1} + 1, 5h \right) + G_{z} + \right.$$

$$+ 1, 2 \left[\frac{5}{16} \frac{H l_{c}}{P} - 1, 2 \left(R_{1} + R_{2} \right) \right] \frac{10}{8} \frac{H}{\cos(\alpha/2)} \right\} \times (6)$$

$$\times \frac{d_{2}}{2} \left(tg(\psi + \rho') \right),$$

где C_1 — жесткость пружины патрона для автономной подачи шпильки при завинчивании;

 $\Delta\lambda_1$ — предельная деформация пружины патрона;

h — длина завинчивания шпилек;

 G_z — вес шпильковерта;

 \tilde{H} — высота полного профиля резьбы;

 $l_{\rm c}$ — длина сбега резьбы на шпильке; $R_{\rm 1},\ R_{\rm 2}$ — высота микронеровностей профиля резьбы шпильки и резьбового отверстия соответственно;

α — угол профиля метрической резьбы.

Действительный момент затяжки шпильки равен сумме моментов затяжки при ручной сборке (выражение (5)) и момента от возникновения момента сил инерции (выражение (4)):

$$M_3 = M_3' + M^{\text{HH}}. (7)$$

Тогда осевая сила затяжки шпильки равна:

$$Q_{3} = \frac{2M_{3}}{d_{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho')} = \frac{4(M'_{3} + M^{\mathrm{UH}})}{d_{2} \operatorname{tg}(\psi + \rho')}.$$
 (8)

Должно выполняться условие, при котором осевая сила затяжки должна быть меньше осевой силы при срезе резьбы:

$$Q_3 < F_{\rm cp}. \tag{9}$$

Силу, действующую при срезе резьбы, можно найти из выражения [2, 3]:

$$\tau_{\rm cp} = \frac{F_{\rm cp} \cos(\alpha/2)}{\pi D_1 H_1 k} \le \left[\tau_{\rm cp}\right],\tag{10}$$

где H_1 — высота неполного профиля резьбы, $H_1 = \frac{5}{8}H;$

k — коэффициент, учитывающий тип резьбы; D_1 — внутренний диаметр резьбы.

Из выражения (8) с учетом уравнений (6), (4) при известном значении момента инерции J_z находим предельную угловую скорость вращения резьбовой детали, при которой не произойдет среза резьбы при затяжке шпилек механизированным способом.

Библиографический список

- 1. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 656 c.
- 2. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1970. 544 с.
- 3. Решетов Д.Н. Детали машин: учебник. М.: Машиностроение, 1980. 496 с.
- 4. Яблонский А.А. Курс теоретической механики. Ч. 2. Динамика: учебник. М.: Высшая школа, 1971. 488 с.



ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 621.501

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

Методика активного гашения и возбуждения колебаний с учетом запаздывания управляющего воздействия

Рассмотрена механическая система с источником автоколебаний с характеристиками сложного типа. Для гашения и возбуждения колебаний введено силовое воздействие. Показано, что при наличии запаздывания в цепи обратной связи имеет место снижение эффективности воздействия. Проведена коррекция параметров управляющего воздействия с учетом наличия запаздывания, которая приводит к незначительному снижению эффективности воздействия. Результаты компьютерного моделирования показывают эффективность такой коррекции.

A mechanical system with a source of self-oscillations with characteristics of a complex type is considered. For damping and excitation of vibrations introduced force effect. It is shown that if there is a lag in the feedback circuit, there is a decrease in the effectiveness of the action. Correction of control parameters was carried out taking into account the presence of delay, which leads to a slight decrease in the effectiveness of exposure. The results of computer simulation showing the effectiveness of such a correction are given.

Ключевые слова: автоколебательная система, управляющее силовое воздействие, запаздывание, инерционность, собственная частота колебаний, возмущающая сила, гармоническая линеаризация, компьютерное моделирование.

Keywords: self-oscillatory system, managing forcing influence, delay time, inertia, natural frequency, disturbing force, harmonic linearization, computer modeling.

Методика активного гашения и возбуждения автоколебаний с характеристиками сложного типа с использованием силового и параметрического воздействия рассмотрена в работах [1-3], где управляющее воздействие определяется как мгновенная (т.е. без учета временного запаздывания) функция координаты системы x(t) и ее скорости $\dot{x}(t)$. При проектировании систем в реальном времени и их моделировании приходится учитывать тот факт, что управляющее воздействие происходит с некоторым запаздыванием по отношению к тому моменту времени, когда сформирован управляющий сигнал, из-за инерционности исполнительных органов систем управления. В действительности управляющее воздействие может быть определено как функция координат $x(t-\tau)$, $\dot{x}(t-\tau)$, где т — временное запаздывание. В силу этого периодический режим и его амплитуда будут отличаться от расчетного режима, что может привести к снижению эффективности активного гашения и возбуждения колебаний. Однако возможна такая коррекция параметров управляющего воздействия с учетом наличия запаздывания, которая приведет к незначительному снижению эффективности воздействия.

В настоящей работе методика активного гашения и возбуждения автоколебаний с характеристиками сложного типа доработана с учетом запаздывания на примере силового воздействия и проведена проверка работоспособности этой доработки.

Уравнение динамики для гашения или возбуждения автоколебаний описывается дифференциальным уравнением:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 \left(1 + h \cos \left(2\omega_0 t \right) \right) x + f(\dot{x}) =$$

$$= B \sin \left(\omega_0 t \right) + u(x, \dot{x}), \tag{1}$$



где ω_0 — собственная частота колебаний;

 $f(\dot{x})$ — функция линейной и нелинейных составляющих упругой и диссипативной сил,

$$f(\dot{x}) = k_1 \dot{x} \operatorname{abs}(\dot{x}) - k_2 \operatorname{sign}(\dot{x}) + 2k_3 \dot{x} + k_4 \dot{x}^3;$$

B — параметр внешней гармонической возмущающей силы;

h — параметр внешнего периодического параметрического возмущения.

Закон силового воздействия $u(x, \dot{x})$ имеет вид:

$$u(x, \dot{x}) = \left(\omega_0^2 - \omega\right)^2 x + \frac{\left(f_2(A) - \operatorname{fh} B\right)\dot{x}}{\omega}, \quad (2)$$

где ω — частота силового воздействия, которая может не совпадать с собственной частотой колебаний ω_0 ;

 $f_2(A)$ — коэффициент гармонической линеаризации функции $f(\dot{x})$ с дополнительным параметром A,

$$f_2(A) = \frac{8k_1\omega^2 A}{3\pi} - \frac{4k_2}{\pi A} + 2k_3\omega + \frac{3k_4\omega^3 A^2}{4};$$

 ${\rm fh} B$ — коэффициент гармонической линеаризации внешних возмущений, ${\rm fh} B = \frac{\omega_0^2 h}{2} + \frac{B}{A}$.

Для упрощения последующих записей введем обозначения:

$$b_{1} = \omega_{0}^{2} - \omega^{2};$$

$$b_{2} = \frac{8k_{1}\omega^{2}A}{3\pi} - \frac{4k_{2}}{\pi A} + 2k_{3}\omega +$$

$$+ \frac{3k_{4}\omega^{3}A^{2}}{4} - \frac{\omega_{0}^{2}h}{2} - \frac{B}{A}.$$
(3)

Для расчета интегральной интенсивности силового воздействия за время T используем формулу:

$$I_{u} = \int_{0}^{T} (u(x, \dot{x}))^{2} dt.$$
 (4)

Условия $\omega_0 = \omega$; $f_2(A) - \text{fh}B = 0$ позволяют определить параметр A^* , при котором отсутствует силовое воздействие. Выбор дополнительного значения параметра $A > A^*$ обеспечивает увеличение максимальной фактической амплитуды колебаний (т.е. возбуждение), а $A < A^* - \text{уменьшение максимальной фактической амплитуды колебаний (т.е. гашение).}$

Эффективность решения задач гашения и возбуждения колебаний зависит от выбора дополнительного параметра A и интегральной интенсивности I_u .

Фактически закон силового воздействия $u(x, \dot{x})$ с учетом запаздывания имеет вид:

$$u(x(t-\tau), \dot{x}(t-\tau)) = \gamma_1 x(t-\tau) + \frac{\gamma_2}{\omega} \dot{x}(t-\tau),$$
 (5)

где γ_1 , γ_2 — коэффициенты, требующие опрелеления.

Для расчета коэффициентов γ_1 , γ_2 используем первое гармоническое приближение $x(t-\tau)$ и $\dot{x}(t-\tau)$:

$$x(t - \tau) = A \sin(\psi - \omega \tau);$$

$$\dot{x}(t - \tau) = \omega A \cos(\psi - \omega \tau),$$

где A — дополнительный параметр размерности амплитуды;

 $\psi = \omega t + \varphi$ — полная фаза колебаний;

 ϕ — начальная фаза.

После преобразований [4] получим систему двух алгебраических уравнений с неизвестными коэффициентами γ_1 , γ_2 для определения закона силового воздействия по формуле (5) с учетом запаздывания:

$$\begin{cases} b_1 = \gamma_1 \cos \omega \tau + \gamma_2 \sin \omega \tau; \\ b_2 = -\gamma_1 \sin \omega \tau + \gamma_2 \cos \omega \tau. \end{cases}$$
 (6)

Решение этой системы с учетом обозначений (3) определяют коэффициенты γ_1 , γ_2 для расчета закона силового воздействия $u(x, \dot{x})$ с учетом запаздывания по формуле (5):

$$\gamma_{1} = \left(\omega_{0}^{2} - \omega^{2}\right)\cos\omega\tau - \left(\frac{8k_{1}\omega^{2}A}{3} - \frac{4k_{2}}{A} + 2k_{3}\omega + \frac{3k_{4}\omega^{3}A^{2}}{4} - \frac{\omega_{0}^{2}h}{2} - \frac{B}{A}\right)\sin\omega\tau;$$
$$\gamma_{2} = \left(\omega_{0}^{2} - \omega^{2}\right)\sin\omega\tau + \frac{3k_{4}\omega^{3}A^{2}}{4} - \frac{3k_{4}\omega^{3}A^{2$$

$$+\left(\frac{8k_1\omega^2A}{\frac{3}{\pi}}-\frac{4k_2}{\frac{\pi}{A}}+2k_3\omega+\frac{3k_4\omega^3A^2}{4}-\frac{\omega_0^2h}{2}-\frac{B}{A}\right)\cos\omega\tau.$$

При $\tau = 0$ формулы (2) и (5) совпадают.

На рис. 1 показаны зависимости от дополнительного параметра A максимальной фактической амплитуды колебаний A_f и интегральной интенсивности силового воздействия I_u за период колебаний T при отсутствии периодических возмущений.

При $A^* < 1,7$ (в точке $A^* = 1,7$ интенсивность $I_u = 0$) происходит гашение колебаний, а при $A^* > 1,7$ наблюдается их возбуждение.



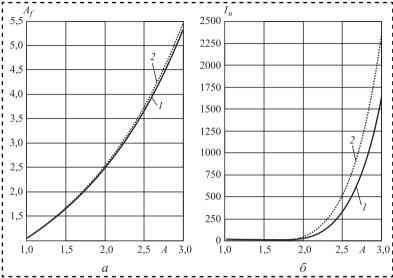


Рис. 1. Итоговый расчет эффективности гашения и возбуждения колебаний при силовом воздействии без учета запаздывания ($\omega_0=1$; $k_1=0,1;\ k_2=0,3;\ k_3=-0,5;\ k_4=0,5,\ h=0;\ B=0$): $I-\omega=1,\ A^*=1,7;\ 2-\omega=1,05;\ A^*=1,6;\ a-A_f(A);\ \delta-I_u$ (A)

На рис. 2 приведены расчеты влияния показателя времени запаздывания т на амплитуду колебаний, что позволяет сравнить их с результатами расчета, приведенными на рис. 1, без учета времени запаздывания.

Сравнение амплитуды гашения колебаний при силовом воздействии показывает, что время запаздывания $\tau \leq 2$ практически не меняет эффективность гашения колебаний, и влияние заметно только при $\tau = 3$ (рис. 2, a).

Время запаздывания $\tau \leq 2$ практически не меняет эффективность при возбуждении колебаний, влияние времени запаздывания начинается только при $\tau = 3$ (рис. 2, δ).

На рис. 2, ϵ , ϵ показано влияние времени запаздывания τ при наличии двух

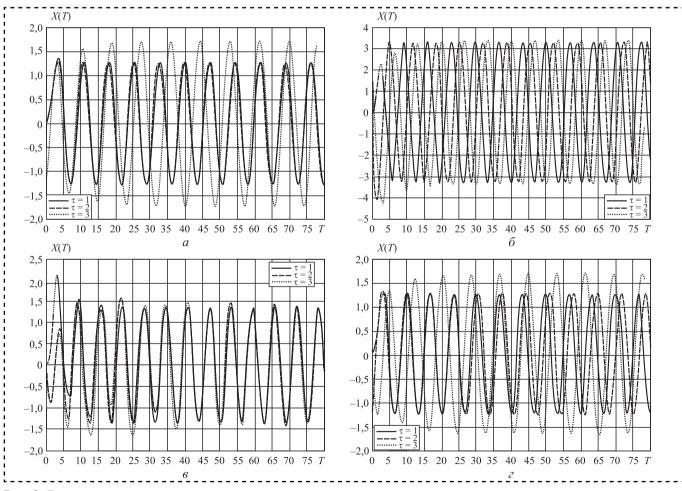


Рис. 2. Влияние времени запаздывания τ при:

 $a-\omega_0=1;\ A=1,2;\ B=0;\ h=0;\ k_1=0,1;\ k_2=0,3;\ k_3=-0,5;\ k_4=0,5;\ \omega=1;\ \delta$ — действии силового воздействия на возбуждение колебаний: $\omega=1;\ \omega_0=1;\ A=2,7;\ B=0;\ h=0;\ k_1=0,1;\ k_2=0,3;\ k_3=-0,5;\ k_4=0,5;\ \theta$ — действии силового воздействия при наличии двух источников внешних возмущений: $B=0,5;\ h=0,5;\ \omega_0=1;\ k_1=0,1;\ k_2=0,3;\ k_3=-0,5;\ k_4=0,5;\ \omega=1;\ A=1,4;\ \varepsilon$ — действии силового воздействия, когда частота силового воздействия не совпадает с собственной частотой колебаний: $\omega_0=1;\ \omega=1,05;\ k_1=0,1;\ k_2=0,3;\ k_3=-0,5;\ k_4=0,5;\ h=0;\ B=0;\ A=1,2$



источников внешних возмущений (B=0.5; h=0.5) или когда частота силового воздействия не совпадает с собственной частотой колебаний ω_0 ($\omega_0=1$; $\omega=1.05$).

Анализ полученных результатов показал, что в методике с характеристиками сложного типа учет времени запаздывания $\tau \le 2$ практически не меняет эффективность активного гашения и возбуждения автоколебаний, и влияние времени запаздывания начинается только при $\tau = 3$.

Выводы

- 1. Разработанный алгоритм учета времени запаздывания управляющего воздействия в методике активного гашения и возбуждения с характеристиками сложного типа позволяет не снижать эффективность всей методики в целом.
- 2. Результаты расчетов подтверждают работоспособность предлагаемой методики активного гашения и возбуждения колебаний.

Библиографический список

- 1. **Эрлих Б.М.** Методика активного гашения и возбуждения колебаний в машинах и механизмах // Международная конференция "Машины, технологии и материалы для современного машиностроения": сборник тезисов конференции. М.: ИМАШ РАН, 2018.
- 2. **Эрлих Б.М.** Применение общей процедуры параметрического и силового гашения фрикционных колебаний в системах с нелинейными силами // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 8. С. 360—366.
- 3. **Эрлих Б.М.** Методика активного возбуждения колебаний с характеристиками сложного типа в машинах и механизмах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. № 3. С. 131—136.
- 4. **Израилович М.Я., Эрлих Б.М., Рочагов А.В.** Активное гашение фрикционных автоколебаний с учетом запаздывания виброгасящего воздействия // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 1. С. 34—36.





Читайте в следующем номере:

Розинов А.Я. Переносные средства сборки и их применение при выполнении монтажа металлических конструкций

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Воркуев Д.С., Матросов А.Е., Миронова Е.А. Предельные режимы выполнения вспомогательных операций многошпиндельными завинчивающими устройствами

Жуков Д.В., Коновалов С.В., Афанасьев А.В. Особенности диагностики заводских дефектов труб, развивающихся в условиях эксплуатации

Губарев П.В., Тептиков Н.Р., Шапшал А.С., Морозкин И.С., Больших И.В. Методика проведения тяговых испытаний локомотивов

Ноженков М.В. Вихревые структуры роста кристаллов

Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Электронная модель изделия как носитель конструкторско-технологической информации



УДК 621.7; 541

А.Н. Петров, д-р техн. наук (Московский политехнический университет),

Б.А. Логинов (НИУ "Московский институт электронной техники"),

М.А. Петров, канд. техн. наук, С.Г. Пономарев, канд. физ.-мат. наук,

(Московский политехнический университет),

А.Б. Логинов (МГУ им. М.В. Ломоносова)

E-mail: m.a.petrov@mospolytech.ru

Исследование смазочных материалов на основе коллоидного графита и дисульфида молибдена, используемых в процессах горячего деформирования сталей и сплавов

Приведены результаты исследования смазочных материалов, применяемых в процессах горячей обработки материалов давлением. Получены гранулометрические характеристики порошков графита и дисульфида молибдена, исследована морфология частиц этих порошков, выявлено влияние размеров и формы частиц, а также степени разбавления концентратов смазочных материалов и шероховатости поверхности (подложки) образца на микроструктурирование контактной поверхности образцов. Применяли техники сканирующей зондовой, электронной, конфокальной микроскопии и лазерной дифрактометрии.

The research targeted an investigation of lubrication materials used during hot forming processes. The granulometric characterization of graphite powder and disulfide molybdenum was performed. The morphology of powder's particles was investigated. The influence was states for both of particles' sizes and dilution percentages of lubrication concentrate and substrate roughness on the self-organization of film particles on the contact surface. Following analytical technics were used: scanning probe, electron, confocal microscopy and laser diffraction spectroscopy.

Ключевые слова: морфология частиц, смазочный материал, коллоидный графит, дисульфид молибдена, гранулометрический анализ, сканирующая зондовая микроскопия, шероховатость, топография поверхности, горячее деформирование.

Keywords: powder particle morphology, granulometry, lubrication material, colloidal-graphite, disulfide molybdenum, scanning probe microscopy, roughness, surface topography, hot deformation.

Введение

Смазывающие свойства графита связаны с относительно легкой деформацией материала

из-за слабых межплоскостных связей по сравнению с сильными плоскостными межатомными связями (рис. 1) [1]. В процессах горячей и полугорячей обработки металлов давлением (ОМД) графит широко применяют благодаря хорошей адгезии с металлом при высоких температурах.

Смазочные материалы (СМ) на основе коллоидного графита в настоящее время нашли применение как за рубежом, так и в России на автомобильных и машиностроительных заводах для штамповки различных сталей и сплавов на автоматизированных линиях, а также универсальных

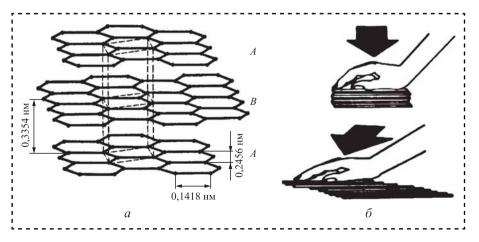


Рис. 1. Гексагональная решетка графита (а) и эффект "карточной колоды" (б)



прессах. Это сравнительно новый вид СМ, представляющих собой сложную композицию, свойства которой в значительной степени определяются диспергированным коллоидным графитом. Технология получения коллоидного графита весьма трудоемкая [1]. В процессе нанесения СМ на контактные поверхности инструмента или заготовки происходит микроструктурирование поверхности, образование смазочной пленки различной толщины и изменение шероховатости [2]. Образование пленки зависит от размеров и формы частиц, вязкости основы и шероховатости исходных контактных поверхностей [3].

Цель работы — экспериментальное определение влияния размеров частиц графита и MoS_2 , содержащихся в суспензиях СМ и степени разбавления концентрата СМ на образование пленки различной толщины и шероховатости.

В работе [2] исследовано влияние шероховатости поверхности (металлической подложки) на микроструктурирование пленки. Стальные образцы после механической обработки (токарной обработки, шлифования и полирования) имели параметр шероховатости Rz = 30 мкм, Rz = 3 мкм и Rz = 1 мкм соответственно. На поверхность образцов суспензию наносили методом распыления СМ на основе дисульфида молибдена, разбавленную 1:3 (одна часть концентрата и три части воды). Образование пленки на поверхности образцов исследовали на сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000. Установлено, что шероховатость поверхности подложки (углеродистая сталь) влияет на микроструктурирование графитовых пленок.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Исследования выполняли на порошках коллоидного графита (образец № 1 и 2) и на порошке дисульфида молибдена MoS_2 (образец № 3). Образцы № 1 и 3 использовали для приготовления суспензии "А" и суспензии "Т" соответственно. Морфологию частиц изучали с помощью электронного микроскопа QUANTA 650 (FEI) и сканирующего зондового микроскопа CMM-2000 [4]. Исследование размеров частиц выполняли на лазерном дифрактометре ANALYSETTE 22 NanoTec plus (FRITSCH).

Микроструктурирование (образование пленки) исследовали на конфокальном микроскопе LEXT 4100 (OLYMPUS) на двух стальных цилиндрических образцах из углеродистой стали, прошедших пескоструйную обработку. Средняя шероховатость поверхности образцов составила Rz = 18 мкм.Суспензию СМ "А" на основе графита (образец № 1) и суспензию СМ "Т" на основе дисульфида молибдена (без разбавления; суффикс в маркировке — К) наносили методом окунания на стальные образцы и изучали топографию поверхности.

Гранулометрический анализ частиц порошков выполняли на лазерном дифрактометре ANALYSETTE 22 NanoTec plus (FRITSCH). Образцы порошков коллоидного графита № 1 и 2 и дисульфида молибдена № 3 предварительно диспергировали в поверхностно-активных веществах.

Размеры отдельных частиц графита, нанесенного на стальную подложку, находятся в диапазоне от 400 до 1200 нм (рис. 2, *a*, *б*). Использование электронного микроскопа QUANTA 650 (FEI) с программным обеспечением позволяет выделить отдельные зерна графита с различной кратностью увеличения. Однако построение дифференциальных и интегральных кривых распределения зерен графита не представляется возможным.

На рис. 2, θ , ϵ показаны снимки порошка графита в сканирующем зондовом микроскопе СММ-2000 с большими увеличениями. Построены дифференциальные и интегральные кривые распределения диаметров частиц порошка графита (рис. 3). Средние значения диаметров $d_{10} = 4.9$ мкм; $d_{50} = 8.2$ мкм и $d_{90} = 10.9$ мкм на количественных уровнях 10, 50 и 90 %. На рис. 4 представлена трехмерная реконструкция исходного снимка.

Интегральная функция распределения Q(d) для трех рассматриваемых образцов, полученных на лазерном дифрактометре, представлена на рис. 5, a. Частицы всех образцов имели размеры от 2 до 15 мкм. Образец № 3 содержал больше мелких частиц, чем образцы № 1 и 2, на что указывает наименьшее значение параметра d_{50} и, как следствие, наибольшее значение площади удельной поверхности (табл. 1). Образцы № 2 и 3 имели бимодальное распределение, что говорит или о полифракционном составе порошков, или о присутствии в образцах частиц с сильно выраженной анизотропией



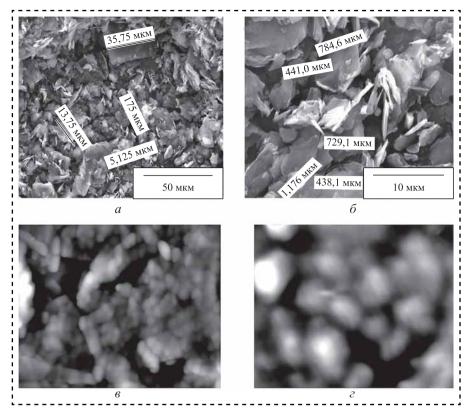


Рис. 2. Порошок графита:

a — электронный растровый микроскоп QUANTA 650, ×1000; δ — QUANTA 650, ×5000; δ — CMM—2000, размер кадра 1,8 × 1,3 мкм, ×100 000; ϵ — CMM—2000, размер кадра 380×270 нм, ×500 000

формы. Так образец № 2 может содержать вытянутые частицы с характерными размерами 6 и 13 мкм, а образец № 3 — 3 и 10 мкм. На рис. 5, σ представлены графики диффе-

12,5 10,0 7,5 5,0 2,5 2,5 Распределение 50 100 10 Диаметр, мкм a100 Доля частиц, % 80 60 40 20 20 50 10 100 Диаметр, мкм б

Рис. 3. Дифференциальная (a) и интегральная (б) кривые распределения диаметров частиц порошка графита

ренциальной функции распределения q(d) рассматриваемых порошков. Образец № 1 имел монофракционный состав с максимумом при $d \approx$ ≈ 7 мкм. Для него функция распределения q(d) симметричная типа распределения Гаусса. Различие $d_{\scriptscriptstyle \mathrm{M}}$ и d_{50} составляет не более 5 %, что свидетельствует о сбалансированном представлении мелких и крупных частиц в исследуемой пробе (см. табл. 1).

С другой стороны, эти образцы могут представлять собой парные композиции монофракционных порошков практически изометрических частиц. Выбор между той или иной гипотезой можно сделать, только проведя дополнительные исследования с помощью микроскопии.

Образцы порошков № 2 и 3 использовали для приготов-

ления суспензий смазочных материалов, смешивая в коллоидной мельнице вместе с другими ингредиентами, входящими в состав СМ (табл. 2).

Сравнительные результаты исследования размеров частиц на лазерном дифрактометре приведены в табл. 3. Средний размер частиц D в смазочных материалах "А" и "Т" составляет 4,8 и 5,6 мкм соответственно.

На рис. 6 показаны реконструкции поверхностей пленок для суспензии СМ "А"-К с Ra = 2,13 мкм и суспензии СМ "Т"-К с Ra = 7,09 мкм соответственно, полученных на конфокальном микроскопе, параметр шероховатости стального образца (подложки) — Rz = 18 мкм.



Таблица 1

Статистические характеристики распределений размеров частиц порошков, мкм

Officery	$d_{\scriptscriptstyle m M}$	D	d_{10}	d_{50}	d_{90}	Размах	Удельная	
Образец (мода)			(среднее	$(d_{90}-d_{10})/d_{50}$	поверхность, см ² /см ³			
1	5,5	6,4	2,3	5,4	12,6	1,8	15 900	
2	13,2/6,0*	8,6	2,8	7,9	15,5	1,6	11 580	
3	3,3/10,0*	6,4	2,2	4,6	13,7	2,6	20 125	
* Указань	* Указаны положения значимых локальных максимумов функции распределения.							

Таблица 2 Распределение размеров частиц после помола в суспензиях СМ, мкм

Суспензия СМ	d_{10}	d_{50}	d_{90}
"A"-K*	0,9	3,4	10,4
"T"-K**	1,7	4,5	12,0

^{*} СМ на основе графита, образец № 2.

Таблица 3 Сравнительные результаты исследований размеров частиц порошков и суспензий СМ, мкм

Название образца	d_{10}	d_{50}	d_{90}	$d_{\scriptscriptstyle\mathrm{M}}$	D
Образец № 1	2,3	5,4	12,6	13,2	8,6
"A"-K*	0,9	3,4	10,4	3,5	4,8
Образец № 3	2,2	4,6	13,7	3,3	6,4
"T"-K**	1,7	4,5	12,0	3,9	5,6

^{*} СМ на основе графита, образец № 2.

^{**} CM на основе MoS₂, образец № 3.

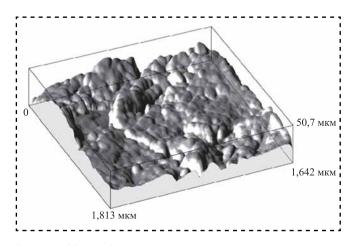


Рис. 4. 3D-изображение поверхности частиц порошка графита, полученное на микроскопе CMM—2000

Полученные результаты сравнивали с результатами исследования СМ на основе дисульфида молибдена табл. 4 [2].

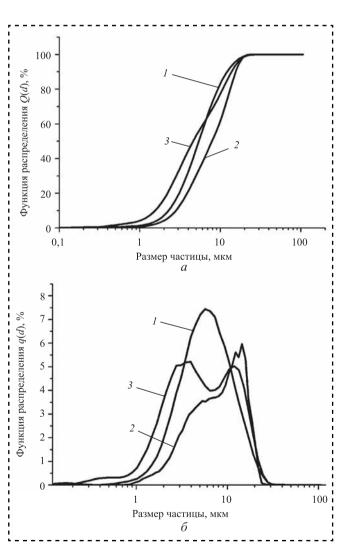


Рис. 5. Графики функций распределения для порошков графита (1, 2 — образцы № 1 и № 2 соответственно) и дисульфида молибдена (3 — образец № 3, MoS_2): a — интегральная кривая; δ — дифференциальная кривая

^{**} CM на основе дисульфида молибдена, образец № 3.



Сравнительные результаты исследования СМ

Таблица 4

Da MKM HOORO		· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Способ нанесения	Примечание	
обработки	"T"	"A"*	покрытия	•	
30	0,48	_			
3,0	0,12	_	Распыление	50 % концентрата	
1,0	0,08	_			
10	7,09	_	Ovyvyovyvo	100 % концентрата	
18	_	2,13	Окунание		
	механической обработки 30 3,0	Rz, мкм, после механической обработки после нанесе после на	механической обработки "Т" "А"* 30 0,48 — 3,0 0,12 — 1,0 0,08 — 7,09 —	Rz, мкм, после механической обработки после нанесения покрытия Способ нанесения покрытия 30 0,48 — 3,0 0,12 — Распыление 1,0 0,08 — 7,09 — Окунание	

^{*} В работе [2] исследование смазочного материала "А" не проводили.

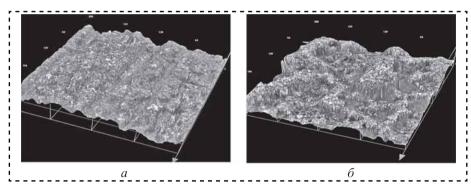


Рис. 6. Пленка смазочной суспензии: a — "A"-K; δ — "T"-K

Выводы

Исследования СМ на основе коллоидного графита и дисульфида молибдена показывают, что:

- при нанесении СМ на металлические образцы происходит микроструктурирование поверхностей;
- размеры и форма частиц порошков зависят от технологии получения исходного продукта коллоидного графита/дисульфида молибдена;
- размеры частиц, содержащиеся в суспензии "Т" (на основе дисульфида молибдена) имеют больший размер, чем частицы, содержащиеся в суспензии "А" (на основе графита);
- шероховатость поверхности металлической основы (подложки), размеры частиц и концентрация суспензии СВ влияют на структури-

рование пленки покрытия и, соответственно, на ее толщину.

Современное оборудование в микроскопии позволяет решать исследовательские и производственные задачи, связанные с созданием новых СМ для процессов ОМД. Полученные результаты можно учитывать при выборе СМ для процессов горячего деформирования и прогнозирования стойкости инструмента (штампов).

Библиографический список

- 1. **Петров А.Н.** Коллоидно-графитовые смазочные материалы в процессах горячего деформирования сталей и сплавов. М.: МГМУ "МАМИ", 2012. 212 с.
- 2. **Методика** исследования тонкой структуры коллоидно-графитовых пленок на поверхности стальных образцов с разной шероховатостью / А.Н. Петров и др. // Заготовительные производства в машиностроении. 2018. № 5. С. 235—239.
- 3. **Петров М.А., Петров А.Н., Коротков И.А.** Комплексное исследование реологических свойств смазочных материалов // Известия ТулГУ. Серия: Технические науки. 2017. № 11 (1). С. 253—260.
- 4. **Логинов Б.А.** Сканирующая туннельная и атомно-силовая микроскопия: учебно-методическое пособие. М.: МИФИ, 2008. 224 с.

В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 621.914

М.Р. Гимадеев, В.М. Давыдов, д-р техн. наук (Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск) E-mail: davellut@mail.ru

Корреляционные связи показателей шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом

Рассмотрены вопросы, связанные с требованиями, предъявляемыми к качеству поверхности согласно функциональному назначению. Проведено исследование факторов, влияющих на величину и характер шероховатости поверхности при фрезеровании сферическим инструментом. Получены корреляционные зависимости между параметрами шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287—2014.

The issues related to the requirements for the surface quality according to the functional purpose. The study of factors affecting the size and nature of the surface roughness during milling with a spherical tool. The correlation between the roughness parameters according to the GOST R ISO 4287—2014.

Ключевые слова: шероховатость, фрезерование, корреляционные зависимости, обрабатывающий центр.

Keywords: roughness, milling, correlation dependences, machining center.

Введение

Шероховатость поверхности играет важную роль в обеспечении требуемых эксплуатационных и функциональных показателей изделий. Традиционно контролируемые параметры шероховатости поверхности согласно ГОСТ 2789—73 не дают полной оценки функциональных свойств поверхности, так как не могут полностью описать форму микрорельефа.

Наиболее подробно триботехнические свойства поверхности описываются параметрами шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287—2014, в соответствии с которым регламентируются следующие параметры шероховатости: максимальная длина профиля Rp, максимальная глубина впадины профиля Rv, максимальная высота профиля Rc, общая высота профиля Rt, арифметическое среднее отклонение оцениваемого профиля Ra, среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля Rsk, эксцесс оцениваемого профиля Rsk, осредняя ширина элементов профиля Rsk, среднеквадратический угол оцени-

ваемого профиля $R\Delta q$, коэффициент смятия профиля Rmr (c), различная высота профиля среза $R\Delta c$, относительный коэффициент смятия Rmr.

Однако режимы резания при фрезеровании сферическим инструментом для обеспечения параметров шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287—2014 в современных справочных данных отсутствуют. Кроме того, сложность измерения заключается в том, что контролируемые поверхности деталей машин имеют не только горизонтальные поверхности с разными углами наклона, но выпуклые и вогнутые. Таким образом, значительная часть времени уходит на измерение указанных параметров шероховатости. В свою очередь, установление корреляционной взаимосвязи между параметрами шероховатости способствует уменьшению трудоемкости процесса контроля качества поверхностей.

Цель работы — установление корреляционных связей между показателями шероховатости при фрезеровании сферическим инструментом.

Определены параметры шероховатости, влияющие на эксплуатационные характери-



Таблица 1
Параметры микрорельефа
исходя из функционального назначения поверхности

Функциональное Параметры назначение Герметичность. Ra, Rq, Rp, RSm, Rpk непроницаемость Износостойкость Rz, Rp, $R\Delta a$, $R\Delta p$, RskRv, Rmr, RSm, Rvk, Mr2, Горение, смазывающая Vo, Rδc способность Сцепление, притирание, Rzсклеивание Коррозионная стойкость, Ra, $R\Delta a$, $R\Delta q$, Rv, Mr2изоляционная способность Концентрация напряжений Rz., Rv., Rvk и усталостная прочность Прочность и качество Rp, $R\Delta a$, $R\Delta q$, RSm, Rcпокрытий Rp, RSm, Rpk, Rsk Выносливость Отделение (сдирание) Rz, RSm, Ra, $R\Delta a$, $R\Delta q$, lr Rp, Rz, W_{EM}, RSm, Rsk Вибрационная активность

стики поверхности (табл. 1), выявлена необходимость выбора оцениваемых параметров микрорельефа не только высотных, но и шаговых для обеспечения функционального назначения поверхности [1, 10—12, 14, 18].

Преобладающий параметр для обеспечения функционального назначения поверхностей — параметр Rz и его составляющие Rp, Rv как наиболее часто встречающиеся [12—14, 18—20].

Обеспечение и повышение качества изделий — одна из главных задач промышленных предприятий в связи с необходимостью повышения конкурентоспособности продукции на мировом рынке.

Одно из наиболее эффективных направлений в решении этой задачи — технологическое обеспечение параметров шероховатости поверхности для заданных условий эксплуатации изделий. Данный факт связан с тем, что в процессе эксплуатации поверхностный слой детали подвергается наиболее сильному физико-химическому и механическому воздействию, вследствие чего разрушение деталей в большинстве случаев начинается с поверхности.

Решая проблему технологического обеспечения качества деталей, необходимо раз-

работать такие технологические параметры обработки, которые обеспечивают требуемые параметры шероховатости, определяемые функциональным назначением поверхностей изделий.

Анализ существующих способов получения сложнопрофильных деталей показал, что достижение наилучших показателей качества осуществляется при обработке на обрабатывающих центрах ЧПУ, как правило, имеющих три линейные координаты и две угловые [3—5, 13, 16], при этом необходимость в угловых координатах обусловлена предъявляемыми требованиями к концевым сферическим фрезам в процессе механической обработки.

Методическое обеспечение теоретических исследований обработки сложнопрофильных деталей

Фрезерование с точки зрения особенности процесса, зависимости рекомендуемых подач и шероховатости, достаточно широко исследованы и разработаны рекомендации по выбору металлорежущего инструмента и подбора оптимальных режимов резания при фрезеровании, но без учета требований, предъявляемых к параметрам шероховатости поверхности согласно ГОСТ Р ИСО 4287—2014.

Наибольшее распространение для определения шероховатости поверхности получили приборы, работающие по методу ощупывания поверхности алмазной иглой. К этой группе приборов относят профилометры. Но проводить аудит каждого изделия на производстве невозможно, так как детали машин дополняются большинством поверхностей свободной формы, что усложняет процесс контроля параметров шероховатости. Таким образом, разработка критериев для обоснованного выбора эффективных режимов резания, обеспечивающих заданные параметры качества, является актуальной задачей.

Наибольший практический интерес представляют 10 амплитудных и шаговых параметров микрорельефа [8, 9, 14, 15, 17—20].

Наиболее значимые параметры шероховатости с точки зрения функционального назначения: Ra, Rz, Rq, Rp, Rc, Rt, Rv, Rku, Rsk, RSm. Используя данный "набор" параметров шероховатости, профиль поверхности описывается не только высотными характеристиками



поверхности, но и функциональными свойствами. Характерная форма микрорельефа служит фактором обоснованного выбора способа обработки фрезерованием.

Установление корреляционной взаимосвязи указанных параметров снижает трудоемкость контроля качества изделий. Достаточно провести исследование после механической обработки одного или нескольких параметров, и полученными рекомендациями можно охарактеризовать остальные параметры шероховатости после обработки фрезерованием сферическим инструментом.

Методическое обеспечение экспериментальных исследований обработки сложнопрофильных деталей

Для проведения экспериментальных исследований использовали технологическое оборудование DMG DMU 50 ecoline с ЧПУ и системой управления Heidenhain TNC 620. Фрезеровали призматические детали с различными углами γ (рис. 1). Поверхность A — технологическая база; C — измерительная база. Для поверхностей B и C соблюдали условие параллельности $\gamma = \gamma'$. На поверхности B проводили механическую обработку с припуском IZ для получения микрорельефа.

Значения углов наклона обрабатываемой поверхности в направлении движения подачи варьировали от 0 до 50°, припуск IZ = 0,1 мм и IZ = 0,2 мм, подача на зуб от Sz (Fz) = 0,1 мм/зуб до Sz (Fz) = 0,5 мм/зуб.

Обработку проводили концевыми сферическими фрезами D=6 мм с числом зубьев Z=2

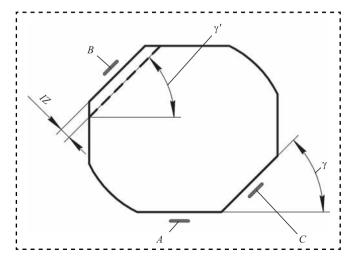


Рис. 1. Эскиз обрабатываемой детали

и фрезой D = 12 мм, Z = 4 фирмы Sandvik Coromant, используемые режущие инструменты характеризуются рядом параметров, определяемых стандартом ISO 13399.

Методика измерения микрорельефа поверхности после механической обработки заключалась в следующем. Деталь устанавливали на столик профилометра SURFCOM 1800D на измерительную базу C. Измерения проводили на поверхности B по различным трассам в трех направлениях.

В качестве материалов экспериментальных образцов использовали материалы АМг6 с твердостью 63 НВ и сталь 20 с твердостью 163 НВ после отжига.

Анализ диаграмм рассеяния позволяет сделать заключение о существовании корреляционной связи между параметрами Ra, Rz, Rt, Rq, Rp, Rc, Rv, а именно сделать вывод о наличии статистической взаимосвязи между исследуемыми параметрами шероховатости поверхности (рис. 2). Выявленные связи указывают не только на то, что увеличению одной переменной соответствует увеличение или уменьшение другой, но и на наличие предопределяющих микрорельеф поверхности технологических параметров, а также возможность влияния на одни получаемые параметры шероховатости через изменение других параметров, взаимосвязанных с ними.

Выявлены корреляционные зависимости параметров шероховатости, получаемые при фрезеровании сферическим инструментом (рис. 3). В каждой группе выделили группообразующий параметр, а объединение в группы проводили при условии, что Евклидово расстояние между ближайшими элементами минимально по сравнению с другими.

Группа	Параметры
первая	Ra; Rq; Rp; Rc
вторая	Rz; Rt; Rv
третья	Rku; Rsk
четвертая	RSm

Параметры *Rsk*, *Rku*, *RSm* распределили в разные группы в связи с разными размерностями и удаленностью в Евклидовом расстоянии (см. рис. 3).

При проведении корреляционного анализа после обработки сферической концевой фрезой для каждой выделенной группы параметров получили зависимости:



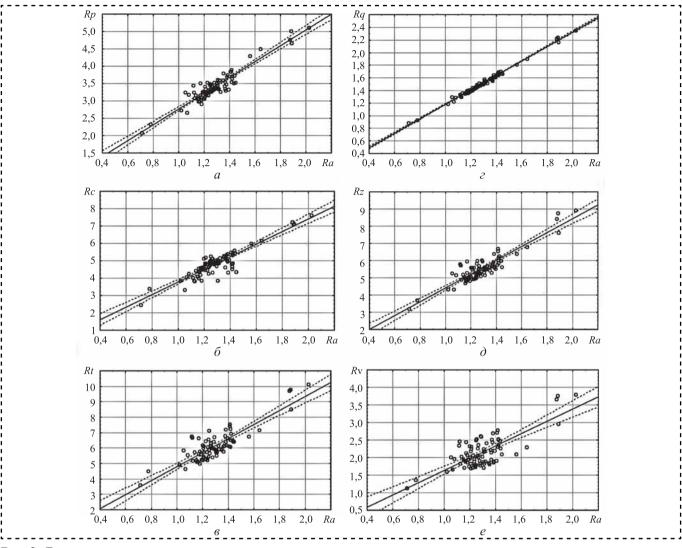


Рис. 2. Диаграммы рассеяния: a-Ra от $Rp; \ \delta-Ra$ от $Rc; \ e-Ra$ от $Rt; \ e-Ra$ от $Rq; \ \partial-Ra$ от $Rz; \ t-Ra$ от Rv

Tаблица 2 Параметры шероховатости в зависимости от угла обработки при фрезеровании сферическим инструментом

Параметры		Угол наклона обрабатываемой поверхности γ, °						
шероховатости и погрешности	10	20	30	40	50	Δ_{max} , %		
<i>Ra</i> , мкм	1,696*/1,695	1,424/1,438	1,327/1,346	1,193/1,219	1,206/1,232	2.2		
Δ(<i>Ra</i>), %	0,1	1,0	1,4	2,2	2,1	2,2		
<i>Rz</i> , мкм	6,945/7,212	5,724/6,118	5,491/5,728	4,901/5,189	5,151/5,242	6,9		
Δ(<i>Rz</i>), %	3,8	6,9	4,3	5,9	1,8	0,9		
Rt, MKM	7,493/7,969	6,507/6,736	6,107/6,297	5,280/5,689	5,607/5,748	7.0		
Δ(<i>Rt</i>), %	6,3	3,5	3,1	7,8	2,5	7,8		
Rq, mkm	1,965/1,981	1,651/1,669	1,553/1,558	1,395/1,405	1,410/1,420	1.1		
Δ(<i>Rq</i>), %	0,8	1,1	0,3	0,7	0,7	1,1		
<i>Rp</i> , мкм	4,492/4,356	3,533/3,737	3,429/3,517	3,145/3,212	3,232/3,241	5.0		
$\Delta(Rp)$, %	3,0	5,8	2,6	2,1	0,3	5,8		
<i>Rc</i> , мкм	6,446/6,321	4,954/5,334	4,848/4,982	4,602/4,496	4,508/4,543	7.7		
Δ(<i>Rc</i>), %	1,9	7,7	2,8	2,3	0,8	7,7		
Rv, mkm	2,453/2,680	2,191/2,184	1,863/2,007	1,756/1,762	1,919/1,786	0.2		
Δ(<i>R</i> v), %	9,3	0,3	7,7	0,3	7,0	9,3		
* Эксперимен	* Экспериментально полученные значения/теоретически рассчитанные значения.							



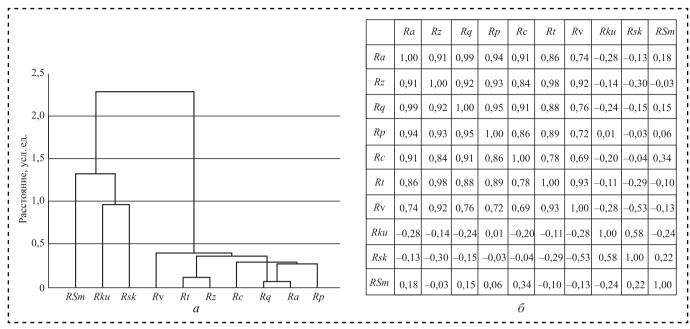


Рис. 3. Корреляционные зависимости параметров шероховатости при обработке сферической фрезой, представленные: a- в виде групп: $\delta-$ в численном соотношении

Rq = 0.039 + 1.145Ra;

Rp = 0.499 + 2.274Ra;

Rc = 0.165 + 3.630Ra;

Rz = 0.391 + 4.022Ra;

Rt = 0.284 + 4.531 Ra;

Rv = -0.531 + 0.403Rt.

Параметры *Rsk*, *Rku*, *RSm* не состоят ни в одной корреляционной зависимости с другими рассматриваемыми параметрами и распределяются хаотичным образом.

Как бы не изменялся параметр Ra, частное среднее X_i (Rsk) остается практически постоянным, это характеризует отсутствие корреляционной связи между исследуемыми параметрами (рис. 4).

Провели механическую обработку на образцах из АМг6 сферической двухзубой фрезой

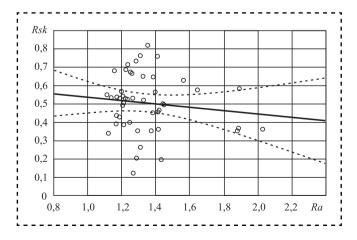


Рис. 4. Диаграммы рассеяния Ra от Rsk

диаметром D = 6 мм фирмы Sandvik Coromant (Sz = 0.4 мм/зуб, припуск для всех образцов IZ = 0.2 мм, скорость резания варьировалась от угла наклона обрабатываемой поверхности).

Для установленных при проведении корреляционного анализа зависимостей погрешность расчета не превышает 10 % (табл. 2).

Заключение

Эксплуатационные свойства деталей в значительной степени определяются параметрами шероховатости их поверхностей. Проанализирована связь параметров микрорельефа и функционального назначения поверхности [3, 9, 12, 14, 15, 17—20]. Эти данные могут быть использованы при назначении требований к качеству поверхностей деталей машин, исходя из функционального назначения.

Впервые получены зависимости межпараметрами шероховатости ЛV согласно ГОСТ Р ИСО 4287—2014 для каждого способа механической обработки фрезерованием, которые могут использоваться технологомпрограммистом или оператором технологического оборудования для оценки параметров шероховатости обрабатываемой поверхности, описывающих функциональные свойства поверхности на этапе подготовки управляющей программы. Для полученных зависимостей погрешность расчета не превышает 10 %.



Установлено, что достаточно провести исследование после механообработки одного или нескольких параметров шероховатости, входящих в одну группу, и полученными рекомендациями можно охарактеризовать остальные параметры шероховатости этой группы, в зависимости от способа механической обработки. Экспериментально установлено, что следует контролировать параметр *Rsk* с учетом эксплуатационного назначения поверхности, так как данный параметр характеризуется отсутствием корреляционной зависимости с рассматриваемыми параметрами шероховатости согласно ГОСТ Р ИСО 4287—2014.

Библиографический список

- 1. **ГОСТ Р ИСО 4287—2014** Геометрические характеристики изделий (GPS). Структура поверхности. Профильный метод. Термины, определения и параметры структуры поверхности. М.: Стандартинформ. 2015.
- 2. **Аршанский М.М., Щербаков В.П.** Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1983. 136 с.
- 3. **Батуев В.А.** Повышение производительности и точности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ путем стабилизации сил резания: автореф. дис.... канд. техн. наук. Челябинск: ЧПИ, 1986. 248 с.
- 4. **Батуев В.В.** Повышение производительности и точности чистового фрезерования пространственно-сложных поверхностей со ступенчатым припуском: автореф. дис.... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУГУ, 2007. 208 с.
- 5. **Выбойщик А.В.** Повышение точности и производительности фрезерования пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ: автореф. дис.... канд. техн. наук. Челябинск: ЮУГУ, 2000. 181 с.
- 6. Гимадеев М.Р., Давыдов В.М., Никитенко А.В., Стельмаков В.А. Исследование влияния методов формообразования при фрезеровании поверхности на параметры микрорельефа // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения: материалы междунар. науч.-техн. конф. Комсомольск-на-Амуре: КнАГТУ, 2015.
- 7. **Гимадеев М.Р., Давыдов В.М.** Обеспечение точности деталей на обрабатывающих центрах 3+2 координаты // Информационные технологии XXI века: сб. науч. тр. Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. 535 с.
- 8. **Еренков О.Ю., Никишечкин В.Л.** Оценка работоспособности деталей из полимерных материалов //

- Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 1. С. 45—47.
- 9. **Малышкин Д.А.** Повышение производительности обработки пространственно-сложных поверхностей на станках с ЧПУ путем управления процессом формирования шероховатости: автореф. дис.... канд. техн. наук. Барнаул: АГТУ им. И.И. Ползунова. 2003. 139 с.
- 10. Никитенко А.В., Филонников А.Л. Исследование влияния режимов резания мелкоразмерным инструментом на качество поверхностей деталей // Проблемы качества машин и их конкурентоспособности: материалы 6-й Международной научно-технической конференции. Брянск: БГТУ, 2008. 580 с.
- 11. **Никитенко А.В.**, **Давыдов В.М.**, **Прокопенко А.А.** Обоснование параметров шероховатости при обработке формообразующей оснастки мелкоразмерным инструментом // Вестник Брянского государственного технического университета. 2010. № 2. С. 26—30.
- 12. **Никитенко А.В.** Повышение эффективности обработки формообразующей модельной оснастки мелкоразмерным инструментом: дис.... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: ТОГУ, 2010. 145 с.
- 13. **Палей М.М.** Технология производства приспособлений, пресс-форм и штампов. М.: Машиностроение, 1979. 293 с.
- 14. **Рыжов Э.В., Горленко О.А.** Технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами поверхностей. Тула: ТПИ, 1980. 100 с.
- 15. Рыжов О.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
- 16. **Сарбанов С.Т.** Анализ структур операций фрезерования сложных поверхностей на станках с ЧПУ с целью повышения точности и производительности обработки: автореф. дис.... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре: КнАГУ. 1978. 184 с.
- 17. **Суслов А.Г.** Выбор, назначение и технологическое обеспечение параметров шероховатости по ГОСТ 2789—73. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.
- 18. Суслов А.Г. Обеспечение качества поверхности и эксплуатационных свойств деталей // СТИН. 2002. № 2. С. 3-5.
- 19. Табенкин А.Н., Тарасов С.Б., Степанов С.Н. Шероховатость, волнистость, профиль. Международный опыт / под ред. Н.А. Табачниковой. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2007. 136 с.
- 20. **Tokyo** Seimitsu Co. Ltd Application guide manual for surfcom series surface roughness & waviness parameters. Tokyo. 2006. 96 c.





УДК 621.9

H.A. Задорина, В.В. Непомилуев, д-р техн. наук, **Е.В. Олейникова,** канд. техн. наук (Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева) *E-mail:* vvvvnn@yandex.ru

Индивидуальный подбор деталей при сборке как альтернатива необходимости повышения точности их обработки

Приведены результаты исследования возможностей метода индивидуального подбора деталей при сборке машин, содержащих мноногозвенные размерные цепи. Использование предлагаемого алгоритма подбора деталей позволяет существенно повысить точность таких машин, что обеспечивает требуемое качество их сборки с меньшими затратами.

The results of the study of the possibilities of the method of individual selection of parts when assembling machines containing multi-level chains. It is shown that the use of the proposed algorithm for the selection of parts can significantly improve the accuracy of such machines, which makes it possible to provide the required quality of their assembly with lower costs.

Ключевые слова: сборка, размерная цепь, индивидуальный подбор деталей, компьютерное моделирование.

Keywords: assembly, dimensional chain, individual selection of parts, computer simulation.

Введение

Научно-технический прогресс в машиностроении неизбежно сопровождается постоянным повышением требований к качеству выпускаемых изделий. Среди множества параметров качества машин наиболее "проблемные" — параметры точности размеров. При использовании традиционных методов повышения точности машины необходимо повышать точность изготовления ее деталей. Для многих изделий эти требования находятся на границе возможностей существующих технологий. Эти методы постоянно совершенствуются, но процесс протекает достаточно медленно, эволюционно, в связи с чем становится актуальным поиск новых подходов к решению рассматриваемой проблемы.

Качество сборки традиционно обеспечивают методами взаимозаменяемости (полной, неполной или групповой) или компенсации (регулирования и пригонки).

При использовании традиционных методов сборки процесс суммирования погрешностей деталей при образовании сборочного соединения неуправляем и для обеспечения высокого качества сборки изделия необходимо

либо уменьшать допуски на изготовление его деталей (при использовании методов взаимозаменяемости), либо осуществлять компенсацию [1, 2]. Этого недостатка лишен метод индивидуального подбора, основанный на рассмотрении возможных вариантов сочетания деталей и выборе лучшего из них.

В работе [3] исследована возможность метода индивидуального подбора деталей для изготовления машин, содержащих двухзвенные размерные цепи, описаны методики, позволяющие управлять процессом сборки в этом случае.

Исследование возможностей метода подбора в многозвенных размерных цепях

Использование метода индивидуального подбора деталей наиболее эффективно в случае многозвенных размерных цепей, когда взаимная компенсация погрешностей деталей будет иметь наибольшие возможности. Однако для практической реализации этого метода необходимо провести соответствующие исследования и разработать методики, позволяющие:

оценивать результаты сборки процесса сборки до ее физического осуществления;



- оценивать необходимое качество изготовления деталей с учетом особенностей процесса сборки (например, вида распределения показателя качества);
- управлять процессом сборки в условиях изменения как самих параметров качества деталей, так и параметров их распределений.

Для исследования возможностей метода индивидуального подбора в многозвенных размерных цепях использован метод компьютерного моделирования, в ходе которого имитировали процесс сборки методами полной и неполной взаимозаменяемости, а также индивидуального подбора деталей. В качестве модели рассматривали сборку простейших размерных цепей, состоящих из нескольких увеличивающих составляющих и одного замыкающего звена (рис. 1).

В процессе проведения компьютерного эксперимента в MS Excel генерировались соответствующие массивы данных, имеющие случайный разброс и имитирующие составляющие звенья рассматриваемой размерной цепи. Распределения размеров соответствовали равномерному либо нормальному закону. Число значений в каждой выборке — 50. Для корректного сравнения получаемых результатов поля рассеяния размеров составляющих звеньев размерных цепей принимали одинаковыми.

Для сравнения получаемых результатов рассчитаны поля рассеяния при использовании методов полной и неполной взаимо-

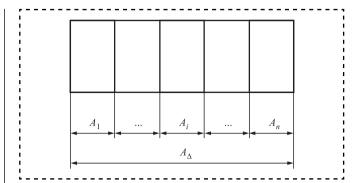


Рис. 1. Схема многозвенной размерной цепи

заменяемости (процент риска 0,27), а также индивидуального подбора деталей по методу полного перебора всех возможных вариантов (табл. 1, 2).

Задачу подбора деталей при сборке размерной цепи можно рассматривать как оптимизационно-комбинаторную задачу. В такой постановке задача заключается в поиске минимума целевой функции:

$$f(\overline{x}) \to \min, \ \overline{x} \in D,$$
 (1)

где $D=\left\{\overline{x}_{1,},\ \overline{x}_{2},\ ...,\ \overline{x}_{n}\right\}$ — множество допустимых решений;

 $\overline{x}_i \in \Omega_i, \ i=2,...,\ n;\ \Omega_i$ — конечное множество значений $\overline{x}_i,$

$$\overline{x}_i = \{x_{i1,} \ x_{i2}, \ ..., \ x_{in}\}.$$

Задачу можно интерпретировать следующим образом. Рассмотрим изделие, состоя-

Таблица 1 Поля рассеяния размеров замыкающего звена по результатам компьютерного моделирования

Номер Число	о Закон	Число вариантов при подборе	Поле рассеяния замыкающего звена при использовании алгоритма			
экспе- римента	звеньев п	распределения	по алгоритму частичного перебора	со случайным выбором	с сортировкой	с частичным перебором
1	2	Равномерный	2000	3,05	0,28	0,28
2	2	Нормальный	2000	1,70	0,46	0,46
3	3	Равномерный	3000	3,85	1,50	0,07
4	3	Нормальный	3000	2,81	0,92	0,03
5	4	Равномерный	1800	4,40	0,50	0,08
6	4	Нормальный	1500	2,95	0,39	0,03
7	5	Равномерный	1500	5,76	1,43	0,03
8	5	Нормальный	1200	3,22	1,16	0,03

Таблица 2

Поля рассеяния размеров замыкающего звена по результатам теоретического расчета

Номер эксперимента	Число вариантов	П	Поле рассеяния замыкающего звена		
	при подборе по методу полного перебора	Число звеньев <i>п</i>	Полная взаимозаменяемость	Неполная взаимозаменяемость	
1	2500	2	3,60	2,55	
2	2500	2	3,60	0,85	
3	125 000	3	5,40	3,12	
4	125 000	3	5,40	1,04	
5	6 250 000	4	7,20	3,60	
6	6 250 000	4	7,20	1,20	
7	312 500 000	5	9,00	4,02	
8	312 500 000	5	9,00	1,34	

Примечание. При подборе по методу полного перебора поля рассеяния размеров замыкающего звена равны примерно нулю.

щее из m деталей A_1 , A_2 ,..., A_m . Имеется по n деталей A_1 , A_2 ,..., A_m , действительные размеры которых x_{i1} , x_{i2} ,..., x_{im} (i=1,...,n) случайные числа, подчиняющиеся некоторому заданному закону распределения. Каждому i-му изделию (каждой цепи) соответствует вектор размеров деталей, входящих в состав изделия \overline{x}_i , тогда величина замыкающего звена равна для i-го вектора Δx_i . Задача заключается в минимизации разброса Δx_i на множестве всех полученных изделий:

$$f(\overline{x}) = \max_{i} \left(\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \right) -$$

$$-\min_{i} \left(\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \right) \to \min, \ \overline{x} \in D,$$
(2)

где $\max_i \left(\sum_{j=1}^m x_{ij}\right)$ — максимальный размер изделия;

$$\min_{i} \left(\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \right)$$
 — минимальный размер изделия

для полученного варианта решения.

Наилучший результат при решении данной комбинаторно-оптимизационной задачи будет достигнут в случае перебора всех возможных вариантов решения, что даже для достаточно небольшого запаса деталей на сборке чрезвычайно сложно из-за астрономического количества их возможных сочетаний. Поэтому для решения оптимизационно-комбинаторных задач можно

применять алгоритмы, общая идея которых состоит в замене полного перебора всех вариантов частичными переборами меньших объемов.

Имитацию сборки с использованием индивидуального подбора деталей проводили по нескольким алгоритмам:

- 1) алгоритм со случайным выбором основан на простом случайном суммировании сгенерированных массивов размеров и соответствует методу полной взаимозаменяемости: имеющиеся в базе данных значения A_i суммируются случайным образом;
- 2) алгоритм с сортировкой основан на простом упорядочении массивов размеров: имеющиеся в базе данных значения A_i упорядочиваются: для нечетных i по убыванию, для четных i по возрастанию; затем столбцы упорядоченных таким образом значений A_i почленно суммируются;
- 3) алгоритм частичного перебора основан на стохастических методах оптимизации и реализуется за несколько этапов [4]:
- а) действительные размеры деталей $A_1, A_2,..., A_m$ заносятся в массив. Формируется массив A размерности $n \times m$, который можно рассматривать как n векторов $\overline{x}_i = \{x_{i1}, x_{i2}, ..., x_{im}\}$ или начальное решение задачи \overline{x} ;
- б) вычисляется значение целевой функции для полученного решения $f(\overline{x})$ (а также

$$\max = \max_{i} \left(\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \right) \text{ w min} = \min_{i} \left(\sum_{j=1}^{m} x_{ij} \right);$$



- в) пока не перебраны все изделия, выбираются два изделия. Для этого случайным образом получаем два номера строк массива, которые не помечены как уже обработанные. Выбранные строки помечают как обработанные;
- г) проводят обмен деталями двух выбранных изделий i и j следующим образом: генерируется случайное число k от 1 до m. Для всех деталей от k до m изделий i и j выполняется обмен деталями $x_{il} \xleftarrow{l=k...m} x_{jl}$;
- д) вычисляют размеры вновь полученных деталей. Если размеры обеих полученных деталей принадлежат отрезку [min, max], то вносят изменения в массив с учетом обмена;
- е) пункты а)—д) повторяют. Если были изменения матрицы A, считаем, что получено новое решение;
- ж) если не достигнут критерий окончания процесса, все строки массива делают непомеченными и повторяют пункты а) е).

Критерий окончания работы алгоритма: было сделано три неудачные попытки подряд или число полученных решений равно 3000. Попытка считается неудачной, если в результате не было получено новое решение.

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования.

Эксперимент 1

Параметры:

число составляющих звеньев размерной цепи n=2;

закон распределения размеров деталей — равномерный;

параметры распределения размеров деталей — [0,1; 1,9], т.е. $\omega A_i = 1,8$.

Номинальные размеры составляющих звеньев, целевой размер замыкающего звена, допуски непринципиальны и выбраны только исходя из удобства их использования и интерпретации (рис. 2).

Эксперимент 2

Параметры:

число составляющих звеньев размерной цепи n = 2;

закон распределения размеров деталей — нормальный;

параметры распределения размеров деталей — среднее значение 1, стандартное отклонение $\sigma = 0.3$; соответственно, $\omega A_i = \pm 3\sigma = 6\sigma = 1.8$ (рис. 3).

Эксперименты 3, 5 и 7

Число звеньев размерной цепи n = 3, 4 или 5 соответственно; остальные параметры соответствуют эксперименту 1. Гистограммы распределений размеров и графики, иллюстрирующие вид полей рассеяния замыкающего звена, для этих экспериментов аналогичны приведенным выше для эксперимента 1 (см. рис. 2).

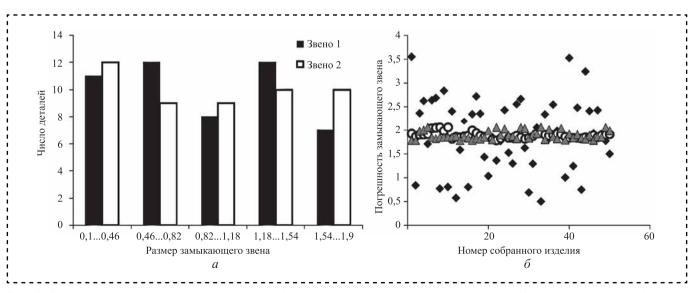


Рис. 2. Гистограммы распределений размеров (a) и поля рассеяния замыкающего звена (б) для эксперимента 1:

◆ — алгоритм со случайным выбором; ○ — алгоритм с сортировкой; ▲ — алгоритм частичного перебора



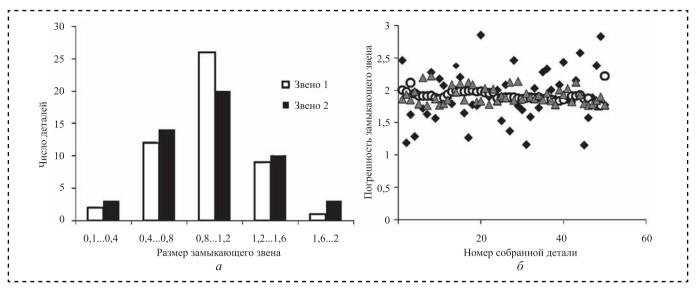


Рис. 3. Гистограммы распределений размеров деталей (а) и поля рассеяния замыкающего звена (б) для эксперимента 2: ♦ — алгоритм со случайным выбором; ○ — алгоритм с сортировкой; ▲ — алгоритм с перебором

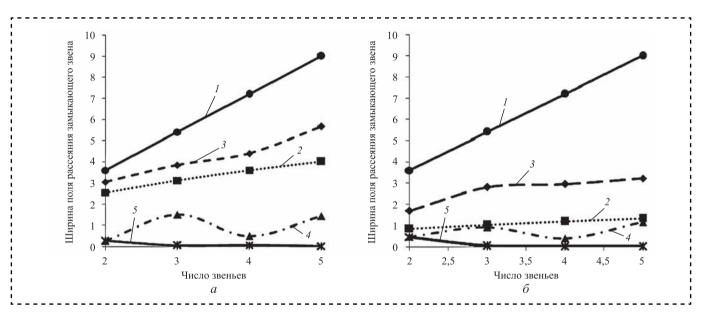


Рис. 4. Ширина поля рассеяния замыкающего звена для цепей с равномерным (a) и нормальным (б) законом распределения размеров:

I — теоретический расчет (полная взаимозаменяемость); 2 — теоретический расчет (неполная взаимозаменяемость); 3 — алгоритм со случайным выбором; 4 — алгоритм с сортировкой; 5 — алгоритм с частичным перебором

Эксперименты 4, 6 и 8

Число звеньев размерной цепи n = 3, 4 или 5 соответственно; остальные параметры соответствуют эксперименту 2. Гистограммы распределений размеров и графики, иллюстрирующие вид полей рассеяния замыкающего звена, для этих экспериментов аналогичны приведенным выше для эксперимента 2 (рис. 3).

На рис. 4 полученные результаты представлены в графическом виде.

Заключение

Индивидуальный подбор деталей перед сборкой во всех случаях позволяет резко снизить погрешность замыкающего звена размерной цепи. При этом погрешность замыкающего звена уменьшается по мере увеличения числа составляющих звеньев.

Алгоритм со случайным выбором — наиболее эффективен и в многозвенных размерных цепях позволяет таким образом подобрать со-



бираемые детали, что они практически полностью взаимно компенсируют погрешности изготовления друг друга.

Наиболее простой алгоритм подбора — алгоритм с сортировкой, основанный на простом упорядочении массивов размеров, близок по эффективности к алгоритму со случайным выбором в тех случаях, когда в размерную цепь входит четное число составляющих звеньев и дает существенно худшие результаты, если число составляющих звеньев нечетное.

Установлено, что по мере увеличения числа составляющих звеньев требования к точности их при использовании индивидуального подбора деталей могут быть даже снижены. Это объясняется тем, что при подборе погрешности составляющих звеньев компенсируют друг друга, а при увеличении числа звеньев в размерной цепи возможности взаимной компенсации увеличиваются.

Следовательно, использование метода подбора позволяет в несколько раз повысить ка-

чество изделия, не завышая требований к деталям и не допуская при этом риска получения дефектного изделия.

Библиографический список

- 1. **Непомилуев В.В., Майорова Е.А.** Исследование возможности повышения качества изготовления высокоточных изделий машиностроения путем учета компенсирующей способности деталей при использовании метода индивидуального подбора // Сборка в машиностроении, приборостроении. № 9. 2009. С. 11—14.
- 2. **Безъязычный В.Ф., Непомилуев В.В., Семенов А.Н.** Обеспечение качества изделий при сборке. М.: Издательский дом "Спектр", 2012. 204 с.
- 3. Непомилуев В.В., Олейникова Е.В., Семенов А.Н. Метод индивидуального подбора деталей как основа обеспечения качества сборки высокоточных изделий // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2016. № 4 (39) С. 37—42.
- 4. **Матренин П.В., Гриф М.Г., Секаев В.Г.** Методы стохастической оптимизации: учебное пособие. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. 67 с.





ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК технолога-машиностроителя

в 2-х томах

Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина

Издание 6-е, переработанное и дополненное 2018 г. 1574 с.

В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.

Цена 15 000 руб.

Том 1. Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

Том 2. Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизикохимическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



УДК 620.19+620.179.1

И.А. Меделяев, д-р техн. наук, **В.В. Спирягин** (Военная академия РВСН имени Петра Великого, г. Балашиха Моск. обл.), **Н.И. Кончаков**, канд. техн. наук, **И.В. Кобзев** (ПАО "Криогенмаш", г. Балашиха Моск. обл.) E-mail: medd ia@mail.ru

Численное моделирование процесса деформации теплообменных труб под действием внешней распределенной нагрузки

Представлены результаты численного моделирования процесса деформации теплообменных труб, выполненных из меди марки МЗр. Проведен анализ распределения эквивалентных напряжений под действием внешней распределенной нагрузки при помощи метода конечных элементов. Выявлена зависимость изменения критического давления, требуемого для деформации трубы, от геометрических размеров начального прогиба.

The results of numerical simulation of the deformation process of heat exchange tubes formed of copper M3r are presented. The analysis of the equivalent stress distribution under the influence of the external distributed load using the finite element method. The dependence of the critical pressure required for deforming the tube by the geometric dimensions of the initial deflection.

Ключевые слова: метод конечных элементов, теплообменные аппараты, испарители, герметичность, пластическая деформация.

Keywords: finite element method, heat exchangers, evaporators, tightness, plastic deformation.

По данным Ростехнадзора [1], по состоянию на 1 января 2018 г. 44,6 % сосудов, работающих под избыточным давлением, исчерпали гарантийные сроки эксплуатации и используются по назначению в 2 раза дольше заявленного срока. Вопрос о продлении сроков эксплуатации данных объектов и повышении достоверности способов оценки их технического состояния требует детального изучения технологических и конструкционных особенностей металлоконструкций, влияющих на показатели их работоспособности.

Потеря работоспособности испарителей холодильных машин, выполненных в виде кожухотрубных теплообменных аппаратов, обусловлена возникновением несовершенства формы (прогибов) теплообменных труб, приводящих к их дальнейшей деформации (смятию), нередко сопровождающейся разгерметизацией вальцовочных соединений.

При техническом диагностировании сверхгарантийных испарителей приоритетной задачей является заблаговременное определение дефектов в виде прогибов труб и их влияния на критическое давление $p_{\rm kp}$ в материале трубы, при котором происходит старт пластического течения.

Для оценки устойчивости напряженно-деформированного состояния цилиндрических оболочек нашли широкое применение различные методы исследования, а также численные методы расчета (метод конечных элементов, метод конечных разностей, метод прямых и т.д.) [2—7].

В работе [7] проведен расчет сминающего давления для длинномерной цилиндрической оболочки в условиях неравномерного наружного давления на ее поверхность для обсадной колонны с применением метода конечных разностей в среде MathLab.

Установлено, что на сминающее давление в значительной мере влияет размер участка неравномерного давления. С увеличением зоны неравномерного наружного давления на поверхность цилиндрической оболочки напряжения возрастают до 36 %.



При расчетах напряженно-деформированного состояния в основном решались задачи контактного давления на поверхность цилиндрических оболочек. Однако точные аналитические решения для определения $p_{\rm кp}$ для труб с несовершенством формы в настоящее время отсутствуют.

В связи с этим проведено численное моделирование процесса деформации бездефектной теплообменной трубы и труб с различными прогибами под действием внешней распределенной нагрузки с применением метода конечных элементов.

Задачу решали в программном комплексе ABAQUS с использованием решателей ABAQUS/EXPLICIT и ABAQUS/STANDARD. На первом этапе проводили линейный расчет потери устойчивости без учета стеснения трубной решетки. На втором — статический анализ с учетом первых трех форм потери устойчивости и со стеснением трубной решетки.

Рассматривали четыре расчетных модели, одна из которых была без дефекта. Дефекты задавали геометрически. Пластические напряжения в зоне образования дефекта не учитывали.

В зоне вальцовочного соединения выявлено наиболее характерное соотношение глубины прогиба u к длине a и ширине b прогиба, составляющее 1/3,2/1,27 мм (рис. 1).

В табл. 1 приведены геометрические размеры дефектов для расчетных моделей без учета формы. Форма дефекта условно принята в виде эллипсоида вращения. Характерная модель представлена на рис. 2.

На рис. 3 представлены расчетные модели труб с учетом дефектов с нанесенной конечноэлементной сеткой.

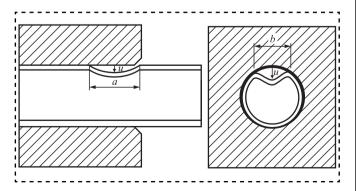


Рис. 1. Схема вальцовочного соединения теплообменных труб с характерным дефектом в виде прогиба

Таблица 1 Геометрические размеры, мм, моделируемых дефектов

Расчетная модель	Глубина прогиба <i>и</i>	Длина прогиба <i>а</i>	Ширина прогиба <i>b</i>		
0	0	0	0		
1	3	9,6	3,81		
2	7	22,4	8,89		
3	11	35,2	13,97		

Таблица 2 Критическое давление, МПа, с учетом трех форм линейной потери устойчивости

Расчетная модель	Форма потери устойчивости					
	1	2	3			
0	507,06	508,81	928,43			
1	488,97	503,85	833,76			
2	561,67	682,53	1060,9			
3	797,86	1071	1478			

Для построения моделей приняты следующие исходные данные: наружный диаметр трубы d=20 мм, толщина стенки трубы s=2 мм, длина трубки L=120 мм. Материал трубы — медь марки М3р с $\sigma_{0,2}=65$ МПа. Модуль упругости $E=1,1\cdot10^5$ МПа.

На первом этапе определена критическая нагрузка потери устойчивости исходной формы равновесного состояния труб. Результаты расчетов о докритическом и закритическом равновесном состоянии труб представлены в табл. 2.

Так как цель исследования — определение критической нагрузки, при которой напряжения

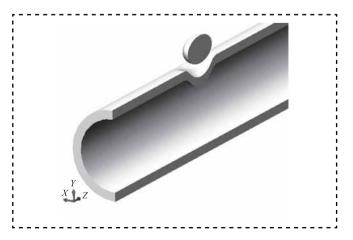


Рис. 2. Форма моделируемого дефекта в трехмерной постановке





Рис. 3. Конечно-элементная модель трубы:

a — бездефектной. Расчетная модель — 0; δ — с прогибом 3 мм. Расчетная модель — 1; ϵ — с прогибом 7 мм. Расчетная модель — 2; ϵ — с прогибом 11 мм. Расчетная модель — 3

в материале трубы достигают предела текучести, в дальнейших расчетах учитывали только первую форму потери устойчивости труб. На рис. 4 на стр. 2 обложки представлены результаты численного решения задачи о докритическом состоянии труб с учетом первой формы потери устойчивости.

На втором этапе выполняли статический анализ с перенесенными условиями. Учитывали стеснение трубной решетки, которая задавалась как жесткое тело с диаметром отверстия, равным внешнему диаметру трубы.

В связи с существенной нелинейностью задачи о потере устойчивости трубы для получения достоверных данных о критической нагрузке применили модифицированный алгоритм Рикса [9] с автоматическим вычислением шага приращения перемещений и нагрузок. Особенность данного алгоритма — величина нагрузки параметрически управляется ходом процесса сходимости численной модели. Достоинство метода состоит в том, что определение ступеней нагружения проводится автома-

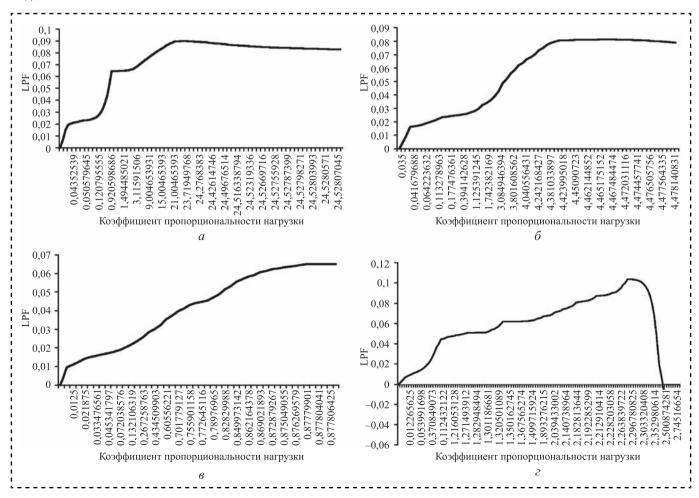


Рис. 5. График Load proportionality factor (LPF) — коэффициент: a-0; $\delta-1$; e-2; $\varepsilon-3$



 Таблица 3

 Сводные данные по результатам численного моделирования

Попомощи	Расчетная модель					
Параметр	0	1	2	3		
Критическое давление с учетом первой формы линейной потери устойчивости, МПа (первый этап)	507,06	488,97	561,67	797,86		
Коэффициент пропорциональности нагрузки (LPF)	0,019	0,017	0,01	0,006		
Критическое давление, МПа (второй этап)	9,6	8,29	5,61	4,7		

тически, а по результатам вычислений строится график пропорциональности нагрузки Load proportionality factor (LPF) (рис. 5).

Как видно из графиков LPF, потеря устойчивости трубы с учетом стеснения трубной решетки в зависимости от размера дефекта произошла при нагрузке 0,6...1,9 % от критической.

Результаты первого и второго этапов расчетов, представленные в табл. 3, позволяют сделать вывод, что при увеличении размеров изначального прогиба критическое давление, необходимое для дальнейшей деформации трубы, уменьшается.

Как видно из анализа эквивалентных напряжений, рассчитанных по теории Мизеса (рис. 6 на стр. 3, 4 обложки), в бездефектной трубе распределение напряжений происходит равномерно по всему материалу. Дефекты формы труб в виде эллиптических прогибов являются концентраторами напряжений, в результате чего пластическое течение в точках перехода от недеформированного участка к деформированному происходит при достижении $\sigma_{0.2}$, но при существенно меньших нагрузках.

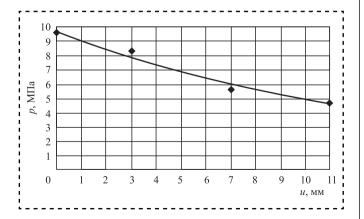


Рис. 7. Зависимость изменения критического давления от глубины начального прогиба трубы

На основании полученных данных построена зависимость изменения критического давления, требуемого для деформации труб испарителя от геометрического размера начального прогиба (рис. 7).

Заключение

Наличие дефектов теплообменных труб в виде прогибов в зоне вальцовочного соединения негативным образом сказывается на работоспособности испарителей холодильных машин. Дефекты формы в виде эллиптических прогибов являются концентраторами напряжений, в результате чего пластическое течение в точках перехода от недеформированного участка к деформированному происходит при существенно меньших нагрузках.

На основании проведенных расчетов получена зависимость, которая может использоваться при разработке схемы нагружения испарителей при техническом диагностировании и экспертизе промышленной безопасности. При регистрации пластической деформации труб (например, получении сигналов акустической эмиссии при нагружении корпуса избыточным давлением) и сопоставлении испытательного давления с параметрами дефектов труб по графику на рис. 7 можно судить о размерах выявленного дефекта теплообменных труб.

Библиографический список

- 1. **Годовой** отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2017 г. М.: НТЦ ПБ, 2018. 420 с.
- 2. **Даревский В.М.** Об основных соотношениях теории тонких оболочек // ПММ. Т. 25. № 3. 1961. С. 519—595.
- 3. **Безухов А.И., Лужин О.В.** Приложение методов теории упругости и пластичности к решению инженерных задач. М.: Высшая школа, 1974. 200 с.
- 4. **Богнер Ф., Фокс Р., Шмидт Л.** Расчет цилиндрической оболочки методом конечных элементов // РТиК. 1967. № 4. С. 170—175.
- 5. Власов Б.З. Общая теория оболочек и ее применение в технике. М.: Гостехиздат, 1949. 784 с.
- 6. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем М.: Наука, 1967. 984 с.
- 7. **Дорофеев Е.В.** Математическое моделирование потери несущей способности при смятии длинномерных цилиндрических оболочек: дис. ... канд. техн. наук. Тюмень, 2012.
- 8. Спирягин В.В., Костюкевич Ю.Н., Панкин Д.А. Анализ неисправностей систем холодоснабжения ракетной техники // ВА РВСН. Балашиха / НТС "Известия". № 270. 2017. С. 176—180.
- 9. **Abaqus User Manual.** Abaqus Theory Guide. Version 6.14. USA.: Dassault Sustems Simulia Corp. 2014.



УДК 621.86+06

М.В. Бойко, канд. техн. наук

(Ростовский государственный университет путей сообщения),

А.П. Сычев, канд. физ.-мат. наук (Южный научный центр РАН, Ростов-на-Дону),

И.В. Колесников, д-р техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения).

С.Ф. Ермаков, д-р техн. наук, Е.Б. Шершнев, канд. техн. наук

(Гомельский государственный университет им. Франциска Скорины, Республика Беларусь) E-mail: alekc sap@mail.ru

Влияние эфиров холестерина на процессы формирования поверхностных антифрикционных пленок*

Исследованы процессы формирования антифрикционных пленок при трении в среде диоктилсебацината (ДОС) с добавками сложных эфиров холестерина капроновой и олеиновой кислот. Актуальность исследования обусловлена разработкой биоразлагаемых смазочных материалов. Органическая часть антифрикционных пленок состоит из молекул диоктилсебацината; неорганическая — включает соединения железа. Холестериловые эфиры способны к плоскостной ориентации на поверхностях трения и образуют слоистые структуры в зоне трибоконтакта, что обеспечивает дополнительное снижение коэффициента трения и повышение энергосберегающих свойств смазки. Этот эффект достигается за счет реализации в зоне трения мезоморфного состояния смазки, которое характеризуется упорядоченным ориентированным расположением молекул мезогенной добавки.

The processes investigations of antifriction films formation at friction in dioctyl sebacate (DOS) medium with additives of cholesteryl esters of caproic and oleic acids are investigated. The relevance of the study is due to the development of biodegradable lubricants. The organic part of antifriction films consists of dioctyl sebacate molecules. The inorganic part includes iron compounds. Cholesteryl esters are capable of planar orientation on friction surfaces and form layered structures in the zone of tribocontact. This provides an additional reduction in the friction coefficient and an increase in the energy-saving properties of the lubricant. This effect is achieved due to the realization in the friction zone of the mesomorphic state of a lubricant, which is characterized by an ordered oriented arrangement of the molecules of the mesogenic additive.

Ключевые слова: антифрикционная пленка, смазка, холестериловый эфир, капроновая кислота, олеиновая кислота, диоктилсебацинат, ИК-спектроскопия, растровая электронная микроскопия.

Keywords: antifriction film, lubricant, cholesteryl ester, caproic acid, oleic acid, dioctyl sebacate, IR spectroscopy, scanning electron microscopy.

Введение

Для увеличения срока эксплуатации, снижения энергетических затрат на сопротивление трению на транспорте необходимо создание новых смазочных материалов (СМ),

Исследование Колесникова И.В., Бойко М.В. по трибологическим исследованиям на торцевой машине трения выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 18-19-00292). с улучшенным адсорбционным взаимодействием с поверхностями трения. Смазочные материалы совершенствуют путем добавления в них функциональных присадок, разнообразных по химической природе и строению, экономичных и экологически безопасных, обладающих высоким смазочным действием и не ухудшающих других характеристик СМ [1, 2].

В настоящее время разработано большое количество высокоэффективных СМ для различных узлов трения, позволяющих экономить топливо или иные виды энергии. К технологиям, повышающим антифрикционные

^{*} Исследования выполнены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований проект № 18-58-00026_Бел_а и Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований проект Т18Р-072.



свойства СМ, можно отнести процесс формирования на трущихся поверхностях антифрикционных пленок.

Обнаружено, что при трении стальных тел в среде сложного эфира дикарбоновой кислоты диоктилсебацината (ДОС) на поверхности трения образуется пленка, о формировании которой свидетельствует снижение до 2—3 раз коэффициента трения. Диоктилсебацинат получают как из касторового масла (возобновляемый источник), так и при помощи ферментативного синтеза [3]. Использование в качестве СМ масел из возобновляемых источников — перспективное направление развития науки, так как природные запасы углеводородов с каждым годом истощаются. Кроме того, диоктилсебацинат относится к биоразлагаемым СМ, попадая в окружающую среду в результате утечки из узла трения, со временем подвергается биодеградации и не наносит вреда экологии [4], в отличие от большинства применяемых в настоящее время присадок.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Изучена возможность применения холестериловых эфиров капроновой (ХЭКК) и олеиновой (ХЭОК) кислот в качестве присадок к экологически безопасным маслам на основе диоктилсебацината.

Холестериловые эфиры показали свою эффективность в качестве присадок к маслам и пластичным смазкам на нефтяных основах [5].

Трибологические испытания СМ проводили на торцевой машине трения по схеме "три пальца по стальному диску". Пальцы и диски изготовлены из стали 30Х13, Ra = 1,5 мкм. Диаметр каждого пальца — 1 см, а расстояние от центра диска до середины дорожки трения — 35 мм. Для обеспечения лучшей воспроизводимости трибологических испытаний пальцы предварительно многократно притирали к стальной поверхности диска. Из всех параметров контролировали только коэффициент трения. Нагрузка на пальцы составляла 2 МПа, скорость скольжения — 0,5 м/с для всех испытаний.

Для сравнения исследование трения и износа металлических пар сталь 45 — сталь 45 в зависимости от времени также проводили в инактивном вазелиновом масле с добавкой

3 % ХЭОК по традиционной схеме испытаний "вал — частичный вкладыш" на установке трения СМТ-1 при нагрузке 3,5 МПа и скорости скольжения 0,5 м/с.

Смазочную способность индивидуальных холестериловых эфиров в зависимости от их молекулярного строения определяли по напряжению волочения медной катанки. Холестериловые эфиры, растворенные в CCl₄ наносили на предварительно подготовленную поверхность катанки. После испарения растворителя заготовку испытывали. Триботехнические свойства оценивали по напряжению волочения медной катанки (ТУ 16.К 71-003—87) диаметром 7,2 мм через волоку, обеспечивающую степень деформации 28,3 %. Предварительно заготовки из медной катанки травили в смеси азотной и серной кислот, промывали дистиллированной водой, сушили, калибровали пропусканием через волоку диаметром 6,985 мм при смазывании вазелиновым маслом. Волочение осуществляли на разрывной машине ZD-20, оборудованной держателем волок, со скоростью 0,002 м/с.

Наличие пленки на поверхности трения подтверждали с помощью растрового электронного микроскопа ZeissEVO-18 MA, укомплектованного датчиками BSD и SE. Ускоряющее напряжение варьировали от 5 до 15 кВ. Пленка является изолятором, поэтому ее на металле хорошо видно. Предварительно стальные поверхности обрабатывали растворителем для удаления излишка СМ.

Элементный микроанализ поверхности проводили SDD детектором X-Max. Активная площадь кристалла детектора составляла $50~\mathrm{mm}^2$.

Антифрикционные пленки исследовали при помощи ИК-Фурье спектроскопии с приставкой НПВО на приборе Nicolet 380.

Объекты исследований: диоктилсебацинат (ДОС), ДОС + 3 % ХЭКК, ДОС + 3 % ХЭОК. Концентрация в 3 % выбрана как наиболее эффективная по результатам предыдущих исследований [6].

Трибологические испытания на торцевой машине трения показали, что добавление холестериловых эфиров капроновой и олеиновых кислот снижает коэффициент трения в системе (рис. 1). При этом эфир олеиновой кислоты наиболее эффективен. Его добавление значительно сокращает время выхода



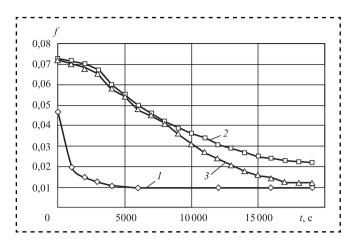


Рис. 1. Результаты трибологических испытаний на торцевой машине трения в СМ на основе диоктилсебацината: $1 - \text{ДОС} + 3\% \text{ X}\Theta\text{K}; 2 - \text{ДОС}; 3 - \text{ДОС} + 3\% \text{ X}\Theta\text{K}$

системы на режим. В чистом ДОС выход на режим, характеризующийся коэффициентом трения 0.02 происходит через 20~000 с от начала испытания, ДОС + 3~% ХЭКК — 13~000 с, ДОС + 3~% ХЭОК — 1000 с.

Аналогичный характер изменения коэффициента трения со временем получен при фрикционном взаимодействии металлических пар сталь 45 — сталь 45 в зависимости от времени испытаний в инактивном вазелиновом масле с добавкой 3 % ХЭОК по традиционной схеме "вал — частичный вкладыш" на установке трения СМТ-1 (рис. 2).

В этом случае требуется гораздо больше времени для достижения минимальных значений коэффициента трения, что может быть обусловлено как инактивностью базовой основы (вазелинового масла в отличие от диоктил-

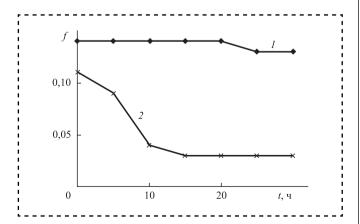


Рис. 2. Результаты трибологических испытаний на установке трения СМТ-1 в СМ на основе инактивного вазелинового масла (1) и с добавкой 3 % ХЭОК (2)

себацината) СМ, так и различными схемами испытаний. При использовании диоктилсебацината (см. рис. 1, кривая 2) в качестве смазки для него также существует определенный латентный период (время достижения минимального коэффициента трения примерно 20 000 с), в то время как для инактивного вазелинового масла этот период практически равен бесконечности (рис. 2, кривая 1).

Холестериловые эфиры капроновой и олеиновой кислоты отличаются молекулярным строением, т.е., числом атомов углерода в алкильном радикале карбоновой кислоты (соответственно, n = 6 и n = 18). Для них получено различное время достижения минимальных значений коэффициента трения. Смазочное действие холестериловых эфиров оценивали при волочении образцов меди с нанесенными на их поверхность различными холестериловыми эфирами в зависимости от числа атомов в алкильном радикале карбоновой кислоты. В указанных условиях холестериловые эфиры выполняли роль твердой смазки.

Исследование поведения напряжения волочения в зависимости от числа атомов углерода в алкильном радикале карбоновой кислоты для выбранных холестериловых эфиров показало, что сопротивление сдвигу уменьшается с увеличением длины алкильного радикала (рис. 3).

Следовательно, смазочная способность холестериловых эфиров, входящих в исследуемый гомологический ряд, зависит от молекулярной массы алкильного радикала. Более высокомолекулярные гомологи обеспечивают

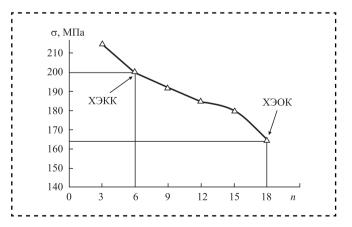


Рис. 3. Влияние числа атомов углерода *п* в алкильном радикале карбоновой кислоты холестериловых эфиров на сопротивление сдвигу при напряжении волочения образцов меди



более низкое трение при волочении, т.е. в таких условиях фрикционного взаимодействия, когда холестериловые эфиры играют роль непосредственной твердой смазки. Отсюда очевидно, почему холестериловые эфиры олеиновой кислоты (n=18) более эффективны, чем холестериловые эфиры капроновой кислоты (n=6) при добавлении в исследуемые смазочные среды, в частности, в диоктилсебацинат (см. рис. 1).

При помощи РЭМ исследована поверхность образцов после трения на торцевой машине в среде ДОС + 3 % ХЭОК (рис. 4).

Проведен элементный анализ поверхности диска без трения (рис. 5, область I), дорожки трения (рис. 5, область 2) и поверхности антифрикционной пленки на дорожке трения (рис. 5, область 3) при помощи SDD детектора X-Max (таблица).

Область 3 (см. рис. 5) содержит исходную поверхность и области, покрытые антифрикционной пленкой. Элементный анализ этой области дает усредненное значение между областями 1 и 2.

Для проведения элементного анализа диск предварительно разрезали на отрезном станке и получали образцы размером 1×1 см с антифрикционной пленкой. Полученные образцы тщательно промывали деионизированной водой 5-6 раз.

Поверхность, не затронутая трением (рис. 5, область *I*), помимо элементов, присущих стали, содержала некоторое количество углерода и кислорода, относящихся к органическим загрязнениям поверхности. Поверхность антифрикционной пленки на дорожке трения (рис. 5, область *3*) содержит большое количество углерода, кислорода и железа. Наличие на поверхности натрия, магния, серы, хлора, калия и кальция объясняется взаимодействием диска со смазочно-охлаждающей жидкостью при резании. Повышенное содержание алюминия и кремния связано с

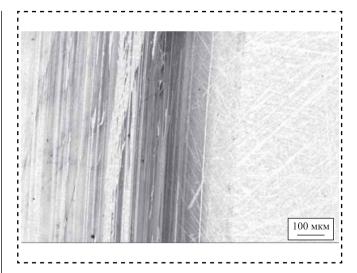


Рис. 4. РЭМ-изображение дорожки трения, сформированной в среде ДОС + 3 % ХЭОК

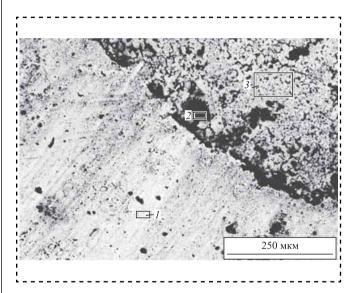


Рис. 5. РЭМ-изображение областей, в которых определен элементный анализ

загрязнением поверхности остатками абразивных частиц.

Полученные данные свидетельствуют о том, что антифрикционная пленка содержит как органическую, так и неорганическую составляющую. Органическая часть состоит из

Элементный	состав	поверхности,	%	ат.

Номер области	С	О	Na	Mg	Al	Si	S	Cl	K	Ca	Cr	Fe
1	3,19	2,5	_	_	0,08	0,29	_	_	_	_	15,65	78,29
2	8,5	3,55	0,39	_	_	0,33	0,12	0,16	_	_	13,33	73,62
3	54,02	19,75	3,22	0,33	1,49	3,63	1,42	1,42	2,18	1,85	_	10,68



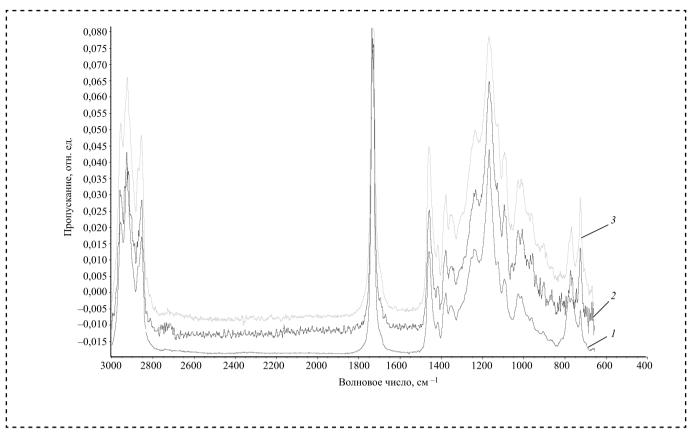


Рис. 6. ИК-спектры антифрикционных пленок, сформированных в среде: 1-ДОС; 2-ДОС+3 % ХЭКК; 3-ДОС+3 % ХЭОК

молекул смазочной среды. Неорганическая часть включает соединения железа, например, оксиды.

Более глубокий анализ составляющих антифрикционной пленки проведен при помощи ИК-спектроскопии НПВО. Предварительно с поверхности трения убрали излишек масла бензином. Спектры антифрикционных пленок, сформированных в среде ДОС + 3 % ХЭКК и ДОС + 3 % ХЭОК, полностью совпадают со спектром дорожки трения, сформировавшейся в среде ДОС (рис. 6). Это свидетельствует о том, что антифрикционная пленка формируется из молекул ДОС. В то же время холестериловые эфиры способны к планарной ориентации на поверхностях трения, что обусловливает образование в зоне трибоконтакта слоистых структур, что дополнительно снижает коэффициент трения, повышая энергосберегающие свойства СМ. Данный эффект достигается за счет реализации в зоне трения мезоморфного состояния СМ, которое характеризуется упорядоченным ориентированным расположением молекул мезогенной присадки. XЭОК более эффективен для снижения трения из-за лучшей растворимости в ДОС (более длинные углеводородные радикалы кислотного остатка).

Выводы

- 1. Добавление холестериловых эфиров жирных кислот к смазкам на основе диоктилсебацината улучшает их энергосберегающие свойства.
- 2. Наиболее эффективна добавка холестерилового эфира олеиновой кислоты.
- 3. Антифрикционная пленка формируется из молекул диоктилсебацината.
- 4. Увеличение энергосберегающих свойств смазки происходит за счет образования в зоне трения мезоморфного состояния СМ, которое характеризуется упорядоченным, ориентированным расположением молекул мезогенной присадки.
- 5. Антифрикционная пленка содержит как органические, так и неорганические компоненты.



Органическая часть состоит из молекул диоктилсебацината. Неорганическая часть включает соелинения железа.

Библиографический список

- 1. Bo N.J. Sliding friction. Physical principles and applications. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000.
- 2. Chan C.H., Tang S.W., Mohd N.K., Lim W.H., Yeong S.K. and Idris Z.l. Tribological behavior of biolubricant base stocks and additives // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. Vol. 93. P. 145—157.
- 3. Colyer C.C. The SAE Lubricants Review Institute — Purpose And Operation // SAE Technical Paper 830653. 1983. doi: 10.4271/830653.
- 4. Dos Santos Corrêa I.N., da Silva S.S.P., de Queiroz D.S. et al. Enzymatic synthesis of dioctylsebacate // J. of Molecular Catalysis B: Enzymatic. Vol. 133. 2016. S. 166—171. doi: 10.1016/j.molcatb.2016.12.011.

- 5. Zainal N.A., Zulkifli N.W.M., Gulzar M., Masjuki H.H. A review on the chemistry, production, and technological potential of bio-based lubricants // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 82. Part 1. 2018. P. 80—102. doi: 10.1016/j.rser.2017.09.004.
- 6. Mannekote J.K., Kailas S.V., Venkatesh K., Kathyayini N. Environmentally friendly functional fluids from renewable and sustainable sources // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 81. Part 2. 2018. P. 1787— 1801. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.274.
- 7. Berezina E.V., Godlevskiy V.A., Usol'tseva N.V. Investigation of Cholesteric Liquid Crystals and Carbon Nanotubes Additives on Mineral Oil Antifrictional and Rheological Characteristics // Procedia Engineering. Vol. 150. 2016. P. 579-583. doi: 10.1016/j.proeng.2016.07.044.
- 8. Ermakov S.F., Kolesnikov V.I., Sychev A.P. Lubricity of cholesteric liquid-crystal nanomaterials in friction of solids // J. of Frictionand Wear. Vol. 2. 2016. P. 136-140. doi: 10.3103/S1068366616020057.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2a, стр. 2 Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;

редакции журнала: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96. Технический редактор Патрушева Е.М. Корректор Сажина Л.И.

Сдано в набор 06.03.2019. Подписано в печать 13.05.2019. Формат $60 \times 88 \ 1/8$.

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.