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

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Есаулов В.В., Рожко Т.Е., Шашков А.Ю., Картусов С.Н. Исследование	
технологических свойств компаунда "Герсил-312"	3
Заярный С.Л., Ильяшенко А.А. Исследование напряженно-деформи-	
рованного состояния конических соединений с увеличенными натягами	
при их сборке-разборке гидропрессовым способом	8
Сорокин М.Н., Кулешов В.Е., Ануров Ю.Н. Комплектование подшипников	
качения	18

Технологическая оснастка для сборки

Морозов А.В., Федорова Л.В., Горев Н.Н., Шамуков Н.И. Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на Паташов В.А., Житников Ю.З. Обоснование предельной скорости подвода к узлу завинчивающего устройства без повреждения штифтовых отверстий на узле и штифтов на исполнительном органе устройства 28

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Кристаль М.Г., Кулагин Р.Н., Хорошевский М.Д., Иванков П.С., Ярошик Д.В. Виброконтактное устройство для контроля диаметров

В помощь конструктору, технологу

Шаломов В.И. Особенности методики расчета выходных характеристик

Трение и смазка в машинах и механизмах

Поляков С.А., Куксенова Л.И., Черторыльский И.С., Хазов С.П. Повышение работоспособности опор скольжения на основе формирования у них адаптационных свойств при использовании пленкообразующих смазочных материалов 38 Израилович М.Я., Эрлих Б.М. Активное гашение вынужденных колебаний в системе с нелинейным демпфированием при действии импульсной

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогу "Роспечать" — 79748, Объединенному каталогу "Пресса России" — **84967**, каталогу "Почта России" — **60257**) или непосредственно в издательстве Тел.: 8 (499) 269-54-98. Факс 8 (499) 269-48-97

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет MOCKBA

А.С. ВАСИЛЬЕВ (главный редактор), д.т.н., проф. А.А. ГУСЕВ, д.т.н., проф. М.В. ВАРТАНОВ, д.т.н., проф. И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц. Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н. Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н.

А И. КУМЕНКО. д.т.н., проф. А.В. МЕДАРЬ, д.т.н. Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН В.В. ПОРОШИН, д.т.н., проф. Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф. А.А. ШАТИЛОВ, к.т.н., доц. А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОЛ Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф. ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД В.Г. КАРАБАНЬ, к.т.н., доц.

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

NWERCK И.В. АБРАМОВ, д.т.н., проф.

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

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф. KOBPOB

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф. КОЛОМНА

Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф. КОМСОМОЛЬСК-На-амуре

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

НАБЕРЕЖНЫЕ ЧЕЛНЫ С.В. ДМИТРИЕВ, д.т.н.

Р.М. ХИСАМУТДИНОВ, к.т.н. НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж. OMCK

В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н. OPFO

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.

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ. Свидетельство

о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

ГА. ЯРКОВ, инж. А.П. ФОТ, д.т.н., проф. рыбинск В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф. В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н.,

проф. А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

CAMAPA Ю.А. ВАШУКОВ, к.т.н., доц.

М.А. ЕВДОКИМОВ, д.п.н., проф. В.А. НИКОЛАЕВ, к.т.н., проф. САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

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

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф. топьятти

А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

TVNA В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф. ХАБАРОВСК

В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф. В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

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

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина KNFR

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

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

ПОЛЬША П. ЛЕБКОВСКИ, д.т.н.

Е. ЛУНАРСКИ, д.т.н

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE JOURNAL IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERING *THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION*



CONTENTS

Modern technologies in assembly

Esaulov V.V., Rozhko T.E., Shashkov A.V., Kartusov S.N. Research
of technological properties of the compound Gercel-312 3
Zaiarnyi S.L., Ilyashenko A.A. Investigation of the stress strain state
of conical connections with an increased tightness when the assembly-
disassembly gidropress way
Sorokin M.N., Kuleshov V.E., Anurov Yu.N. Matching of rolling bearings 18

Technological equipment for assembly

 Morozov A.V., Fedorova L.V., Gorev N.N., Shamukov N.I. A study on the effect of the segment of electromechanical hardening to form a regular plots microhardness
 24

 Patashov V.A., Zhitnikov Yu.Z. Justification speed limit supply to the node screwing device without damaging the pin holes on the unit and the pins on the executive board of the device
 28

Quality assurance. Testing. Monitoring

Kristal M.G., Kulagin R.N., Khoroshevskiy M.D., Ivankov P.S., Jaroshik D.V. Vibratory contacting device to control the diameters of the conductive parts 31

Industrial and design engineer's aid

Friction & lubrication

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

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

Editors

A.S. VASIL'EV (Chief editor) M.V. VARTANOV A.A. GUSEV I.N. ZININA Yu.L. IVANOV Yu.G. KOZYREV

Regional editors BELGOROD N.A. PELIPENKO

O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK Yu.N. KULSHIN A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD M.G. KRISTAL V.G. KARABAN'

V.I. LYSAK V.M. TRUKHANOV IZHEVSK

I.V. ABRAMOV V.G. OSETROV B.A. YAKIMOVICH KA7AN

R.I. ADGAMOV

KOVROV Yu.z. zhitnikov Kolomna

Yu.D. AMIROV Komsomolsk-on-Amur B.N. Marjin

A.M. SHPILEV NABEREZHNYE CHELNY

s.v. dmitriev R.m. Khisamutdinov

NIZHNY NOVGOROD S.V. GOLUBEV

OMSK V.N. KOSTIUKOV

DREL Yu.S. STEPANOV G.A. KHARLAMOV

ORENBURG

Executive editors of current issue: E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN A.I. KUMENKO A.V. MEDAR' E.A. MIKRIN V.V. POROSHIN B.V. SHANDROV A.A. SHATILOV A.G. KHOLODKOVA G.A. YARKOV

A.I. SERDUK A.P. Fot Rybinsk

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

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

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

E.V. SHALOBAEV Sevastopol

e.l. pervukhina T**oliati**

A.I. RYZHKOV **Tula**

A.I. PREYS

KHABAROVSK V.A. LASHKO

V.I. SCHPORT Belarus

MINSK

V.L. BASINJUK M.L. KHEIFETZ GAMFI

V.E. STARZHINSKI

KIEV

A.S. ZENKIN V.A. MATVIENKO DONETSK A.N. MIKHAILOV

Poland P. Lebkovski E. Lunarskii

The journal is registered by Ministry of Telecom and Mass Communications of RF. Registration certificate ПИ № ФС 77-63953. 09.12.2015

Современные технологии сборки

УДК 620.162

В.В. Есаулов, канд. техн. наук, Т.Е. Рожко, А.Ю. Шашков, С.Н. Картусов (Филиал ФГУП "Центр эксплуатации объектов наземной космической инфраструктуры" "Научно-исследовательский институт прикладной механики" им. академика В.И. Кузнецова) E-mail: 073@niipm.ru

Исследование технологических свойств компаунда "Герсил-312"

Приведены результаты исследования технологических свойств компаунда "Герсил-312". Сделаны выводы о возможности применения компаунда "Герсил-312" для пропитки оптоволокна при намотке катушек волоконно-оптического гироскопа. Даны рекомендации об оптимальном процентном содержании катализатора. Предложены дальнейшие направления исследований.

In article results of research of technological properties of the compound Gercel-312. By results of researches the conclusions on the possibility of application of the compound Gercel-312 to impregnate the fiber when winding coils of fiber-optic gyroscope. Recommendations about the optimum percentage of catalyst. Proposed further directions of research.

Ключевые слова: компаунд "Герсил-312", оптоволокно, полимеризация, катализатор.

Keywords: compound Gercel-312, optical fiber, polymerization, catalyst.

Введение

Применение компаунда "Герсил-312" для пропитки оптоволокна при намотке катушек чувствительного элемента волоконно-оптического гироскопа (ЧЭ ВОГ) потребовало проведения исследования его технологических свойств.

Цель исследований — уточнение особенностей поведения образцов компаунда "Герсил-312" в условиях имитации заполнения прибора и при выдержке в вакууме в течение 24 ч, определение характера влияния концентрации катализатора на технологические характеристики компаунда "Герсил-312", а также возможность расширения диапазона концентрации катализатора при применении компаунда "Герсил-312".

Объект исследований

Компаунд силиконовый теплопроводный электроизоляционный "Герсил-312" ТУ 2257-007-40233984—2001 [1] с повышенным уровнем теплопроводящих и электроизоляционных свойств разработан в лаборатории ООО НТЛ "Полисил-М" в 2001 г. (табл. 1). Он предназначен для герметизации, высокого уровня электроизоляции и отвода тепла от нагревающихся элементов электронных схем и узлов приборов, защиты их от воздействия комплексных факторов (влаги, пыли, механических повреждений и т.д.).

"Герсил-312" является двухкомпонентным компаундом, состоит из основного компонента — наполнителя (паста-компонент 1) и комплексного катализатора (компонент 2), имеет высокую собственную адгезионную прочность. В течение трех суток при комнатной температуре компаунд полностью отверждается до резиноподобного материала.

Компаунд выпускают двух марок — Б и С, отличающихся уровнем диэлектрических и теплопроводящих свойств. "Герсил-312" относится к 4-му классу опасности — вещества малоопасные. Группа горючести — трудногорючие материалы. Температура вспышки — 245 °C, воспламенения — выше 300 °C.

Компаунд "Герсил-312" обеспечивает заливку и отверждение в слоях любой толщины, является "ремонтоспособным".

Таблица 1

Физико-механические свойства компаунда "Герсил-312"

Наименование показателей	Значение
Динамическая вязкость при 20 °C, СПз	5000(Б)*40 000(С)
Продолжительность образования поверхностной пленки при 20 °C, ч	0,42,0
Прочность при растяжении, МПа, не менее	1,41,5
Прочность связи с металлом при сдвиге, МПа, не менее	1,41,5
Диэлектрическая проницаемость при частоте 1 МГц и температуре (20 ± 5) °C, не более	4,5 (С), 4,0 (Б)
Тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 МГц и температуре (20 \pm 5) °C, не более	9·10 ⁻³ (С), 1·10 ⁻³ (Б)
Удельное объемное электрическое сопротивление при температуре (20 ± 5) °C, Ом·м, не менее	10 ¹¹ (С), 10 ¹³ (Б)
Электрическая прочность при частоте 50 Гц и температуре (20 \pm 5) °C, кВ/мм, не менее	20
Коэффициент теплопроводности при 20 °С, Вт/м·К	1,0(Б)1,2(С)
Температура эксплуатации, °С	-60+180
* Марки компаунда "Герсил-312": Б и С.	

Основной компонент компаунда представляет собой вязкотекучую жидкость светло-серого цвета, склонную к расслаиванию, на поверхности материала образуются прозрачные слои менее вязкого компонента (силоксанового полимера), а в нижних уплотненных слоях скапливаются массы, обогащенные неорганическим наполнителем, который обеспечивает повышенный уровень теплопроводящих свойств.

Катализатор представляет собой жидкость желто-оранжевого цвета с характерным эфирным запахом. На воздухе при комнатной температуре отвердитель теряет эфирный компонент с выпадением твердого вещества светло-желтого (почти белого) цвета, без запаха. При полном завершении испарения масса твердого вещества составляет 50 % от массы первоначальной жидкости. Инфракрасный спектр твердого осадка, снятый на отражение в тонком слое с помощью ИК-Фурьеспектрометра Nicolet iS10 (рис. 1), позволяет с помощью имеющейся базы данных инфракрасных спектров идентифицировать вещество с достоверностью 70 % как "бентонит" (разновидность легкой глины на основе кремнезема SiO₂).

В зависимости от температуры и относительной влажности воздуха в помещении для увеличения или уменьшения жизнеспособности компаунда массовая доля катализатора в пасте может изменяться в пределах 3...5 %.

Методика исследований

Приготовлены два образца компаунда "Герсил-312" в бюксах и на стеклянных пластинах — двухкомпонентный компаунд "Герсил-312" после полимеризации в соответствии с ТУ и основной компонент компаунда "Герсил-312" (рис. 2 на стр. 2 обложки).

Оба образца размещены в вакуумной камере и проведена откачка камеры.

Образцы выдерживали в вакуумной камере не менее 24 ч, после чего произведен напуск воздуха в камеру.

Во время откачки камеры проводили визуальные наблюдения за образцами, при этом скорость откачки регулировали таким образом, чтобы предотвратить возможное вскипание компаунда.

Результаты исследований "Герсил-312" и его основного компонента

Вакуумирование образцов компаунда "Герсил-312" проводили при температуре окружающего воздуха 23 °С, давлении 756 мм рт. ст. и влажности 16 %.

Проведена четырехкратная очистка камеры с компаундом, осушенным азотом, в следующих временных интервалах:

1-й цикл: откачка 62 мин — 4 мин заполнение;

2-й цикл: откачка 19 мин — 4 мин заполнение;

3-й цикл: откачка 15 мин — 3 мин заполнение;

4-й цикл: откачка 17 мин — 3 мин заполнение.

Откачку камеры с образцами компаунда "Герсил-312" проводили при температуре окружающего воздуха 24 °С и давлении 752 мм рт. ст. в следующей последовательности:

откачка — 4 ч 15 мин до 2,5·10⁻² мм рт. ст; нахождение под вакуумом без откачки — 16 ч;

откачка — 5 ч до $2 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст.





Рис. 1. Инфракрасный спектр твердого осадка, снятый на отражение в тонком слое с помощью ИК-Фурье-спектрометра Nicolet iS10

Общее время нахождения образцов компаунда "Герсил-312" под вакуумом составило 25 ч 15 мин.

Вакуумирование выявило, что материал не летуч. Наблюдали небольшое число пузырьков. Через сутки на образцах с катализатором образовались заметные пузыри, которые видны визуально (рис. 3 на стр. 2 обложки). Дополнительно проведено определение массы препаратов до и после вакуумирования (табл. 2).

Потеря массы образцов при вакуумировании составила в среднем 1,29...2,15 % (в зависимости от соотношения объема и площади поверхности образца) для полимеризованного компаунда И 0,04...0,11 % для основного компонента компаунда без катализатора. Таким образом, для полимеризованного компаунда потеря массы в 20-30 раз больше, чем для основного компонента. После выдержки на воздухе при относительной влажности 53...58 % масса образцов в бюксах не изменилась (в пределах погрешности эксперимента). На предметных стеклах масса образцов полимеризованного компаунда немного (по сравнению с потерей массы при вакуумировании) увеличилась при экспозиции в атмосфере воздуха (в среднем на 0,14 %), а масса образцов основного компонента продолжала уменьшаться (в среднем на 0,09 %).

Полученные результаты показывают, что компаунд "Герсил-312" и его основной компонент негигроскопичны. Потеря массы при вакуумировании связана, по-видимому, с выделением летучих компонентов (в основном, катализатора), растворенных газов и воздуха, захваченного при перемешивании образцов.

Дополнительно был приготовлен бюкс с компа-

ундом без катализатора. При вакуумировании из материала выделялось огромное число пузырей, интенсивность выделения которых снижалась в течение часа вплоть до полного прекращения. Затем отвакуумированный состав был поделен на две части. Одну часть смешали с отвердителем и сразу отвакуумировали, что снова привело к образованию большого числа пузырей. Вакуумирование образца компаунда "Герсил-312" проводили при температуре окружающего воздуха 24 °C, давлении 758 мм рт. ст. и влажности 12 % в следующих временных интервалах:

откачка 1 ч 10 мин до давления $2,5 \cdot 10^{-2}$ мм рт. ст. — напуск воздуха;

Таблица 2

No	Масса, г		Исходная Масса, и масса через 184		са, г, 184 ч "Герсил-312"		Среднее	Масса, г, через 208 ч (после	Изменение массы	Среднее
145	без "Гер- сил-312"	с "Гер- сил-312"	"Герсил-312", г	(после вакуума)	г % ИЗ		ние, %	контакта с воздухом)	"Гер- сил-312", г	ние, %
			"]	Герсил-312", о	отвердите	ль — 2,7	′ % мас.			
			-		Бюкс					
1	6,1252	8,9862	2,8610	8,9487	-0,0375	-1,31		8,9486	-0,0001	
2	6,2299	9,3279	3,0980	9,2869	-0,0410	-1,32	-1,29	9,2869	0,0000	0,00
3	6,5141	9,7018	3,1877	9,6618	-0,0400	-1,25		9,6618	0,0000	
					Пластинк	a				
1	1,7929	1,8250	0,0321	1,8240	-0,0010	-3,11		1,8242	+0,0002	
2	1,9106	1,9680	0,0574	1,9670	-0,0010	-1,74	-2,15	1,9671	+0,0001	+0,14
3	1,8369	1,9796	0,1427	1,9773	-0,0023	-1,61		1,9773	0,0000	
				"Герсил-312	2", отверд	итель —	0 %			
					Бюкс					
1	6,0347	9,3290	3,2943	9,3275	-0,0015	-0,05		9,3276	+ 0,0001	
2	6,1309	9,5769	3,4460	9,5757	-0,0012	-0,03	-0,04	9,7556	-0,0001	0,00
3	6,1530	9,3639	3,2109	9,3626	-0,0013	-0,04		9,3623	-0,0003	
					Пластинк	a				
1	1,7204	1,9975	0,2771	1,9972	-0,0003	-0,11		1,9970	-0,0002	
2	1,8392	2,2136	0,3745	2,2129	-0,0007	-0,19	-0,11	2,2125	-0,0004	-0,09
3	1,7390	2,0782	0,3392	2,0781	-0,0001	-0,03		2,0779	-0,0002	

Определение массы препаратов "Герсил-312" до и после вакуумной обработки

Примечания: 1. Образцы с 2,7 % отвердителя после приготовления (26 °С, влажность 58 %) и определения массы хранили в эксикаторе 160 ч. Для образцов без отвердителя определение массы проводили сразу после приготовления.

Для всех образцов использовали одну и ту же партию "Герсил-312" и соответствующий жидкий отвердитель.
 Образцы с отвердителем после хранения в эксикаторе в течение 160 ч и свежеприготовленные образцы без

отвердителя одновременно подвергали вакуумированию в течение 24 ч, после чего проводили определение изменения массы препаратов.

4. Повторное определение изменения массы всех образцов проводили после дополнительных 24 ч экспонирования их в атмосфере воздуха (26 °С и влажность 53...58 %).

откачка 1 ч 10 мин до давления 3,5 \cdot 10⁻² мм рт. ст. — напуск воздуха.

Вторую часть отвакуумированного состава смешали с катализатором и оставили затвердевать на воздухе. После отверждения состава его еще раз отвакуумировали при тех же условиях. При визуальном осмотре пузырей практически нет.

Исследование влияния концентрации отвердителя на технологические характеристики компаунда "Герсил-312"

Основной компонент компаунда "Герсил-312" в условиях хранения при комнатных температурах является коллоидно-неустойчивой системой, что проявляется в расслоении материала на жидкую силоксановую часть и более плотную часть, обогащенную наполнителем. Согласно инструкции основной компонент годен к применению в течение как минимум полугода и требует перед добавкой катализатора гомогенизирующего перемешивания. После введения 3...5 мас. частей катализатора в короткий срок (менее 1 ч) при комнатной температуре компаунд приобретает упругие свойства и становится резиноподобным, что "замораживает" процессы расслоения ввиду образования трехмерной структуры силоксанового каркаса. Согласно данным изготовителя набор прочности материала происходит в течение 2—3 дней.

При изготовлении катушек ВОГ компаунд необходимо наносить на уложенные слои оптического волокна с помощью кисточки. Это возможно, только если материал имеет достаточный уровень текучести (материал должен быть достаточно жидким) достаточно длительное время для обеспечения завершения технологической операции по укладке волокна на катушку (более суток). Таким образом, применять "Герсил-312" для изготовления ЧЭ ВОГ при внесении отвердителя по инструкции поставщика (3...5 мас. частей) не представляется возможным.

Проведены опыты по исследованию поведения компаунда при пониженной, относительно регламентной, концентрации отвердителя.

Приготовлены 4 бюкса с разными массовыми долями катализатора. Проводили визуальное наблюдение в течение 5 дней (табл. 3).

При анализе отвержденных составов с разной концентрацией катализатора при комнатной температуре было отдано предпочтение составу с 0,39...0,5 % катализатора.

Процесс полимеризации компаунда зависит также и от влажности окружающей среды. Это, вероятно, потребует специального исследования и, соответственно, не рассматривается в рамках настоящей статьи.

С целью определения влияния выбранной концентрации "Герсил-312" на характеристики ВОГ при воздействии на него внешних дестабилизирующих факторов были проведены различные испытания [2]:

Таблица 3 Состояние системы "Герсил-312"—катализатор в зависимости от массовой концентрации катализатора при комнатной температуре 25...26 °С, влажности 55...67 %

Длительность	Macco	овая доля	катализато	opa, %					
наблюдения, ч	0,56	0,50	0,39	0,24					
0	Ж	Ж	Ж	Ж					
16	Т	Ж	Ж	Ж					
24	Т	Т/Ж	Ж	Ж					
40	Т	Т	Ж	Ж					
48	Т	Т	Т/Ж	Ж					
72	Т	Т	Т/Ж	Ж					
96	Т	Т	Т/Ж	Ж					
160	Т	Т	Т	Ж					
Примечание. Визуальная оценка состояния системы: Т (твердое—резиноподобное); Ж (жидкое—вязкотекучее).									

— виброиспытания;

— ударные испытания;

— испытания на стойкость при воздействии линейных ускорений.

Анализ результатов

Полученные результаты показывают, что компаунд "Герсил-312" и его основной компонент негигроскопичны. Потеря массы при вакуумировании связана, по-видимому, с выделением летучих компонентов (в основном, компонентов катализатора), растворенных газов и воздуха, захваченного при перемешивании образцов.

Для процесса намотки при относительной влажности 55...67 % оптимальным является состав герметика "Герсил-312" с 0,4...0,5%-ным содержанием катализатора.

Компаунд с выбранной концентрацией катализатора апробирован в технологии изготовления ЧЭ ВОГ. Результаты испытаний опытных образцов при воздействии на них внешних дестабилизирующих факторов (механических, изменения температуры, вакуума и т. д.) показали соответствие параметров ВОГ, заданным в ТЗ.

Одним из дальнейших направлений работ может быть исследование процесса полимеризации компаунда "Герсил-312" в зависимости от влажности окружающей среды.

Выводы

Результаты исследований показывают возможность применения компаунда "Герсил-312" для пропитки оптоволокна при намотке катушек ЧЭ ВОГ.

Даны технологические рекомендации об оптимальном процентном содержании катализатора. Таким образом, показана возможность расширения диапазона концентрации катализатора при применении компаунда "Герсил-312".

Библиографический список

1. **Компаунд** силиконовый теплопроводный электроизоляционный "Герсил-312" / ТУ 2257-007-40233984—2001.

2. Есаулов В.В., Шишлов А.В., Колосков А.В., Рожко Т.Е. Исследование адгезионных свойств клеягерметика силиконового "Герсил-180" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 6. С. 38-42.



УДК 621.88.084: 621. 813

С.Л. Заярный, канд. техн. наук, А.А. Ильяшенко, канд. техн. наук (Калужский филиал МГТУ им. Н.Э. Баумана) E-mail: texnakon@yandex.ru

Исследование напряженно-деформированного состояния конических соединений с увеличенными натягами при их сборке-разборке гидропрессовым способом

Исследовано напряженно-деформированное состояние конических соединений с увеличенными натягами при их сборке-разборке гидропрессовым способом, вызывающим упругопластические деформации в охватывающих деталях. Приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований. Установлены регрессионные уравнения взаимосвязи исследуемых параметров.

The stress strain state of conical connection with its assembly-disassembly hydropressing method with increased tightness, inducing elastic-plastic deformations in covering details. The results of numerical and experimental studies. The regression equation established the relationship of investigated parameters.

Ключевые слова: конические соединения с натягом, сборка-разборка, гидропрессовый способ, упругопластические деформации, регрессионные уравнения.

Keywords: conical interference fit connection, assembly-disassembly, hydropressing method, elastoplastic deformation, the regression equation.

Введение

Одним из способов повышения несущей способности соединений с натягом (СН) является увеличение давления на сопрягаемой поверхности. Охватывающая деталь СН (ступица) в большинстве случаев может быть аппроксимирована цилиндрической трубой, увеличение рабочего давления в которой обеспечивается допущением упругопластических деформаций при предварительном технологическом нагружении (автофретаж) [1]. Применительно к СН автофретаж ступицы выполняется в процессе специальной технологической операции, что эффективно при формировании неразъемных СН [2]. При этом технологическое давление распределяется по длине ступицы равномерно $p(z) \rightarrow \text{const}$ (равномерный автофретаж). Равномерный автофретаж ступицы, обеспечивается также при механическом или термическом способах сборки СН с увеличенными натягами

 $\Delta \geq \Delta_{pl}$,

где Δ_{pl} — величина натяга, соответствующая возникновению пластических деформаций в ступице.

В случае разъемного соединения, каким является коническое соединение с натягом (КСН) [3], его сборка-разборка способом гидрораспора (СГР) обеспечивается при технологическом давлении $p(z) \rightarrow$ var [4—6] (неравномерный автофретаж [4]).

Цель работы — исследование напряженнодеформированного состояния (НДС) ступицы при ее неравномерном автофретаже в процессе сборки-разборки КСН с увеличенным натягом.

Объект исследования представлял собой КСН с цилиндрической наружной поверхностью ступицы. Конусность сопрягаемой поверхности и среднее значение ее диаметра составляют: c = 1/50; $\langle d \rangle = 98,5$ мм. Размеры и параметры ступицы КСН, выбранные для проведения расчетного и натурного экспериментов в соответствии с точками ортогонального плана [7] полного факторного эксперимента, представлены в таблице.

Размеры и параметры образца № Точки п/п плана *l*. мм β 2*r*_{max}, мм ٢ -1 140 1.4 0.83 1 +1116 2 ± 1 -1 82,5 1,65 0,5 165 3 -1 -170 140 1.4 0,5 4 +1+1137 165 1,65 0,83 5 152 1,52 0 0 100 0,66 Примечание. $\beta = r_{max}/r_{min}; \zeta = l/2r_{max},$ где *l*, r_{max}, r_{min} - длина, наружный и внутренний радиусы ступицы.

Матрица планирования эксперимента

Для экспериментальных исследований детали КСН изготавливали из стали 40Х (закалка с отпуском). Механическая характеристика материала каждого образца ступицы определялась по приближенной эмпирической зависимости, связывающей твердость материала и его предел текучести $\sigma_{\rm T} = 0,367 {\rm HB} - 240 {\rm M}{\rm M}{\rm a}$ [8]. Твердость материала контролировали на приборе TM-2M в шести точках на торцах образцов, а их напряженное состояние — тензометрированием наружной поверхности.

Определение НДС ступицы КСН расчетными методами

В качестве расчетной модели ступицы КСН, в силу малой конусности сопрягаемой поверхности (c = 1/50), была принята толстостенная труба, находящаяся под действием внутреннего давления.

При расчете НДС КСН аналитическим методом, в случае трубы конечной длины, принимаем гипотезу плоских сечений и допущение о несжимаемости материала. При этом для осевых и объемных относительных деформаций справедливо $\varepsilon_z = 0$, $\varepsilon_0 = 0$ [9, 10]. Нагружение толстостенной трубы внутренним давлением формирует в ней пластическую (на внутренней поверхности) и упругую (на внешней поверхности) зоны деформаций. Расчетные размеры этих зон зависят от вида аппроксимирующей функции диаграммы деформирования материала (рис. 1).

При отсутствии упрочнения материала диаграмма деформирования (рис. 1, линия *I*) аппроксимируется условиями:

 $\sigma = \varepsilon E$ при $\varepsilon \leq \varepsilon_{T}$; $\sigma = \sigma_{T}$ при $\varepsilon \geq \varepsilon_{T}$,

где σ , ε , E — нормальное напряжение, относительная деформация и модуль упругости мате-



Рис. 1. Диаграммы деформирования материала: *1* — без упрочнения; *2* — линейное упрочнение; *3* — упрочнение при степенной аппроксимации

риала; σ_{T} , ϵ_{T} — значения σ , ϵ , соответствующие пределу текучести материала.

Радиус, ограничивающий область пластических деформаций при равномерной эпюре давления p(z) = p на внутренней поверхности [9]:

$$r_{\rm T} = \left(\frac{2\delta_r E r_{\rm min}}{3k}\right)^{\frac{1}{2}}; \quad p = k \left[2\ln\beta_{\rm T} - \frac{\beta_{\rm T}^2}{\beta^2} + 1\right], \quad (1)$$

где k — пластическая постоянная ($k = \frac{1}{2}\sigma_{\rm T}$ по теории наибольших касательных напряжений; $k = \frac{1}{\sqrt{3}}\sigma_{\rm T}$ — по энергетической теории); $\beta_{\rm T} = r_{\rm T}/r_{\rm min}$ — коэффициент толстостенности для пластически деформируемой части трубы; δ_r — радиальные перемещения на внутренней поверхности трубы.

При линейном упрочнении материала диаграмма деформирования (рис. 1, линия 2), аппроксимируется условиями:

$$\varepsilon \leq \varepsilon_{\rm T}, \ \sigma = \varepsilon E; \geq \varepsilon_{\rm T}, \ \sigma = \sigma_{\rm T} + E_{\rm T}(\varepsilon - \varepsilon_{\rm T}),$$

где *E*_т — модуль упругости при упрочнении.

3

При принятом допущении $\varepsilon_0 = 0$ закон изменения радиальных перемещений в упругой и пластической зонах идентичен, поэтому



уравнение, связывающее $r_{\rm T}$ и *p* с учетом выражений (1), приобретает вид [9]:

$$p = k \left[\left(1 - \lambda \right) \frac{1}{\beta_{\mathrm{T}}^2} - 2\lambda \ln \left(\beta_{\mathrm{T}} \beta \right) - \frac{1}{\beta_{\mathrm{T}}^2} + \lambda \right], \qquad (2)$$

где λ — параметр упрочнения, $\lambda = 1 - E_{\rm T}/E$.

При нелинейном упрочнении материала диаграмма деформирования (рис. 1, линия 3) может быть аппроксимирована степенной функцией

$$\sigma = \Phi_{\varepsilon}^{m}, \qquad (3)$$

где Ф — модуль упругости при нелинейном упрочнении материала; *m* — параметр.

Параметры Φ , *m* определяются из диаграммы деформирования материала для промежутка $\Delta \varepsilon$, в котором предполагаются деформации значительной части материала [10].

Если точку пересечения диаграммы растяжения материала и аппроксимирующей кривой определить координатами $\sigma = \sigma_{T}^{*}$, $\varepsilon = \varepsilon_{T}^{*}$, то с учетом выражения (3) справедливо $\Phi = \sigma_{T}^{*}/\varepsilon_{T}^{*m}$, $E = \sigma_{T}^{*}/\varepsilon_{T}^{*}$. Тогда соотношение (3) преобразуется к виду

$$\sigma = \left(\sigma_{\rm T}^*\right)^{1-m} \left(E\varepsilon\right)^m.$$
 (4)

При этом граничные значения $0 \le m \le 1$ соответствуют деформациям идеально пластического и упругого материала. В общем случае степенная аппроксимация позволяет описать взаимосвязь деформаций охватывающей детали и давления на внутренней поверхности толстостенной трубы соотношениями [10]:

$$\delta_{r} = \frac{r_{\min}}{2} \frac{\sigma_{T}}{E_{T}} \left[\frac{\sqrt{3}\beta^{2m} pm}{\sigma_{T} \left(\beta^{2m} - 1 \right)} \right]^{\frac{1}{m}};$$

$$p = \left(\frac{E}{\sigma_{T}} \frac{2\delta_{r}}{r_{\min}} \right)^{m} \frac{\sigma_{T} \left(\beta^{2m} - 1 \right)}{\sqrt{3}m\beta^{2m}}.$$
(5)

Рассмотренные соотношения в полной мере справедливы при определении НДС ступицы СН и КСН. При этом *p* необходимо определять с учетом баланса деформаций ступицы δ_r^c и вала δ_r^B в соединении с натягом $\Delta = 2(\delta_r^c - \delta_r^B)$. Для случая сплошного вала и с учетом соотношений (1), (2), (5) справедливо:

$$\delta_r \to \delta_r^c; \ \delta_r^{\mathrm{B}} = -\frac{p(1-\mu)}{E} \langle d \rangle,$$

где µ — коэффициент Пуассона.



Рис. 2. Расчетная модель СН по МКЭ

При расчете НДС КСН методом конечных элементов (МКЭ) [11] расчетная модель представляет совокупность дискретных осесимметричных объемов (конечных элементов), связанных между собой в вершинах поперечных сечений (рис. 2). Условие равновесия полученного таким образом ансамбля конечных элементов устанавливается в форме матричного уравнения

$$\{F_e\} = [K_e]\{\delta_e\},\$$

где $\{F_e\}$ — вектор узловых нагрузок; $[K_e]$ — матрица жесткости элемента e; $\{\delta_e\}$ — вектор перемещений.

Значения элементов матрицы жесткости $[k]^e$ зависит только от условий деформирования материала. При упругом деформировании материала элементы матрицы жесткости постоянны

$$[k]^{e} = 2\pi \int [B]^{\mathrm{T}} [D] [B] r dr dz \rightarrow \mathrm{const},$$

где [B] = [B(r, z)] — матрица положения, содержащая производные от базисных функций; $[D] = [D(E, \mu)]$ — матрица упругости, содержащая характеристики материала.

При упругопластическом деформировании материала эквивалентные напряжения пре-

вышают предел текучести материала σ ≥ σ_т и диаграмма его деформирования трансформируется через переменные параметры упругости (метод упругих решений) [9, 10]. При этом элементы $[k]^e$ изменяются на каждом расчетном цикле *i*: $E \to \text{var}; [D] = [D(E,\mu)] \to \text{var}.$ Koopдината диаграммы деформирования, для *i*-го приближения с учетом упрочнения материала и напряженного состояния в конечном элементе е определяется по выражению $\sigma_{i(i)}^{e} = 1, 1\sigma_{T} + \left(\frac{\sigma_{B} - \sigma_{T}}{2}\right) \left(1 - E_{(i)}^{e}/E\right),$ где σ_{B} — временное сопротивление материала; $E_{i}^{e} = E_{(i-1)}^{e} \frac{\sigma_{i(i-1)}^{e}}{\sigma_{i(i)}^{e}}$ — переменный модуль упругости.

Определение остаточного НДС ступицы КСН расчетными методами выполняли согласно закону о разгрузке [9, 10], который в обобщенных параметрах имеет вид

$$S_i^{res} = S_i - S_i^f, \tag{6}$$

где S_i, S_i^f — действительные и фиктивные значения обобщенных параметров от заданной нагрузки соответственно при условии упругопластического и упругого деформирования материала.

Фиктивные значения параметров НДС ступицы, как толстостенной трубы, определяются как

$$\sigma_{r}^{f} = p \frac{1 - \beta_{r}^{2}}{\beta^{2} - 1}; \ \sigma_{\theta}^{f} = p \frac{1 + \beta_{r}^{2}}{\beta^{2} - 1}; \delta_{r}^{f} = \frac{p}{E} \frac{r}{\beta^{2} - 1} \Big[1 - \mu + (1 + \mu) \beta_{r}^{2} \Big],$$
(7)

где $\beta_r = r_{\text{max}}/r$.

Равномерный автофретаж ступицы может быть рассмотрен при различных аппроксимациях диаграммы деформирования материала: материал без упрочнения, линейное упрочнение материала, степенная аппроксимация упрочнения материала.

Материал без упрочнения. Действительное значение деформации ступицы определяется соотношениями [9]:

с учетом выражения (6)

$$\delta = \frac{r_{\min}}{E} \left\{ \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_{\mathrm{T}} \beta_{\mathrm{T}}^2 + p \left(1 - \mu \right) \right\};$$

с учетом выражения (1)

$$\delta = \frac{r_{\min}}{E} k \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\beta_{\rm T}^2}{k} + 2(1-\mu) \left(\ln \beta_{\rm T} - \frac{\beta_{\rm T}^2}{2\beta^2} + \frac{1}{2} \right) \right].$$
(8)

При представлении радиальных деформаций их относительной величиной $\overline{\delta} = \delta/\delta_{pl}$, где $\delta_{pl} = 2kr_{\min}/E$ — радиальная деформация ступицы, соответствующая началу пластического деформирования материала, соотношение (8) преобразуется к виду

$$\overline{\delta} = \beta_{\rm T}^2 \left[\frac{1}{2k} \frac{\sqrt{3}}{2} - (1-\mu) \frac{1}{2\beta^2} \right] + (1-\mu) \left(\ln \beta_{\rm T} + \frac{1}{2} \right).$$
(9)

Линейное упрочнение материала не влияет на закон распространения радиальных перемещений в упругой и пластической областях [9]. Поэтому действительное значение деформации ступицы также определяется соотношениями (8), (9).

Степенная аппроксимация упрочнения материала позволяет определить остаточные деформации ступицы из соотношения

$$\delta_{res} = \frac{d}{E} \left\{ \frac{\sigma_{\mathrm{T}}}{2} \left[\frac{\sqrt{3}\beta^{2m} pm}{\sigma_{\mathrm{T}} \left(\beta^{2m} - 1\right)} \right]^{\frac{1}{m}} - p\left(1 + \mu\right) \frac{\beta^2}{\beta^2 - 1} \right\}.$$

Результаты определения остаточных радиальных деформаций сопрягаемой поверхности торца ступицы в координатах $\overline{\delta}_{0res}$, $\overline{\delta}$ для различных значений β представлены на рис. 3, *a*, *б* ($\overline{\delta}_{0res} = \delta_{0res}/\delta_{pl}$, $\overline{\delta} = \delta_0/\delta_{pl}$, где δ_{0res} , δ_0 — остаточная и фактическая радиальные торцевые деформации; δ_{pl} — радиальные деформации, соответствующие возникновению пластических деформаций в материале).

Значение параметра m = 0,7 принимали с учетом размеров зон и уровней интенсивности упругопластических деформаций, которые составляли $\varepsilon_i/\varepsilon_{\rm T} \leq 3$. Из сравнения результатов (рис. 3, *a* и *б*) видно, что в случае деформирования материала с упрочнением при степенной аппроксимации диаграммы деформирования ступица обладает большей жесткостью по отношению к остаточным деформациям.

Неравномерный автофретаж ступицы предполагает различные модели формирова-



ния НДС деталей КСН в его средней и торцевой частях. В средней части КСН НДС определяется эпюрой гидростатического давления $p(z) = p_r(z)$, максимальная величина которой в зоне подводящей канавки $p_{r max}$ зависит от технологических факторов [3]. У торца КСН НДС определяется как эпюрой гидростатического давления $p_r(z \to 0; z \to l) \to 0$, так и давлением от натяга $p_H(z = 0; z = l)$. Весовое соотношение этих параметров определяется условием самоторможения деталей КСН [2] с учетом экстремальных значений отношения $(p_{r max} / p_{H})_{max}$ [5].

Расчет НДС КСН в случае неравномерного автофретажа ступицы выполняли по программе, разработанной авторами [4].

Остаточные напряжения (деформации), согласно "закону разгрузки", определяются как разница между действительным и предполагаемым НДС в случае упругом деформировании материала при одинаковом внешнем воздействии:

$$\sigma_{res}^{e} = \sigma^{e}\left(E_{(i)}^{e}\right) - \sigma^{e}\left(E\right); \ \varepsilon_{res}^{e} = \varepsilon^{e}\left(E_{(i)}^{e}\right) - \varepsilon^{e}\left(E\right).$$

Результаты исследований напряженного состояния ступицы КСН, в предположении, что материал ступицы деформируется с упрочнением (аппроксимация диаграммы деформирования по методу упругих решений), представлены графическими зависимостями на рис. 3, в. Из сравнения расчетных зависимостей рис. 3, а, б и в устанавливается очевидное



Рис. 4. Распределение напряжений по среднему сечению ступицы (расчет МКЭ): $1 - \sigma_{\rm T} = 550 \text{ М}\Pi a; \beta = 1,65; \overline{\delta} = 1,24; 2 - \sigma_{\rm T} = 680 \text{ М}\Pi a; \beta = 1,4; \overline{\delta} = 1,18$

влияние способа сборки СН на уровень остаточных деформаций у торцов ступицы. Сравнением расчетных зависимостей и экспериментальных значений можно оценить степень адекватности предложенной математической модели расчета КСН.

На рис. 4 (на примере ступиц с параметрами: $\zeta = 0,875$; $\beta = 1,4$; $\beta = 1,65$) представлены характерные эпюры напряжений в среднем сечении ступицы при сборке-разборке КСН СГР. Эпюры, построенные по результатам расчетного эксперимента: σ_r , σ_t , σ_z — напряжения при нагружении; σ_{rres} , σ_{tres} , σ_{zres} — напряжения после разгрузки. При одинаковой относительной длине ступицы пластические деформации для образцов с коэффициентом толстостенности $\beta = 1.65$ распространяются только на часть поперечного сечения, в то время как в случае $\beta = 1,4$ они охватывают сечение почти полностью. Представленные результаты соответствуют максимально возможным относительным натягам ($\overline{\delta} = 1,24$ и 1,18) при сборке КСН СГР, где вязкостью рабочего тела составляла v₅₀ = = 30 сСт [5]. В этом случае уровень относительных остаточных напряжений $\overline{\sigma}_{ires} = \sigma_{ires} / \sigma_{T}$ в ступице после разборки КСН СГР имеет максимальное значение на ее внутренней поверхности и составляет соответственно 0,349 и 0,357. Близкий уровень $\overline{\sigma}_{ires}$ для $\beta = 1,4$ и $\beta = 1,65$ позволяет сделать предположение о зависимости $\overline{\sigma}_{ires}$ при сборке-разборке КСН СГР только от значений параметров $\overline{\delta}$ и с.

На рис. 5, 6 показаны характерные изменения величин $\overline{\sigma}_i, \overline{\sigma}_{ires}$ на примере расчетных значений, полученных для ступицы с параметрами: $\zeta = 0,875$; $\beta = 1,4$; $\sigma_T = 540$ МПа. Расчеты проводили для эпюры давления рабочего тела соответствующей вязкости рабочего тела $v_{50} = 70$ сСт [5].

На рис. 5 показаны изменения напряжений для точки, расположенной на внутренней (линии 1, 2, 3) и наружной (линия 4) поверхностях сред-



Рис. 5. Изменения относительных интенсивностей напряжений на поверхностях ступицы в зоне подводящей канавки (расчет МКЭ):

1 — сопрягаемая поверхность (полные напряжения после первой сборки); 2 — сопрягаемая поверхность (остаточные напряжения после первой сборки); 3 — сопрягаемая поверхность (полные напряжения после повторной сборки); 4 — наружная поверхность (полные напряжения после повторной сборки)

него сечения ступицы для различных фаз ($p_r =$ $= p_{\Gamma \max}$) его разборки СГР. В первой фазе ($p_{\Gamma} =$ $= p_{\text{г max}}, p_{\text{H}} \neq 0$) вследствие упрочнения материала с увеличением $\overline{\delta}$ возрастает и величина $\overline{\sigma}_i$ (рис. 5, линия 1). Во второй фазе ($p_{\Gamma} = 0$; $p_{\rm H} = 0$) формируется величина $\overline{\sigma}_{ires}$ (рис. 5, линия 2) от остаточных напряжений, имеющих противоположное по сравнению с напряжениями первой фазы направление. Для $\overline{\delta} \leq 1,3$ видно, что выполнение условия $\overline{\sigma}_i + \overline{\sigma}_{ires} \leq 2$ свидетельствует об отсутствии повторных пластических деформаций (отсутствие эффекта Баушингера) в ступице. Полученный результат с учетом незначительного влияния коэффициента β на величину $\overline{\sigma}_i$ можно распространить на все типоразмеры КСН.

Остаточные напряжения и напряжения от натяга имеют противоположное направление, поэтому их суммирование приводит к снижению $\overline{\sigma}_i$ от напряжений в ступице после сборки КСН (рис. 5, линия 3). Значение $\overline{\sigma}_i$ меньше величины при первой фазе разборки соеди-





1 — полные напряжения на наружной поверхности при первой разборке; 2 — полные напряжения на внутренней поверхности при первой разборке; 3 — остаточные напряжения на внутренней поверхности после первой сборки

нения (рис. 5, линия *1*). После сборки КСН с увеличением $\overline{\delta}$ уровень $\overline{\sigma}_i$ на ее наружной поверхности возрастает (рис. 5, линия *4*).

На рис. 6 на примере КСН, собранного СГР при $\overline{\delta} = 1,39$, показано изменение относительной интенсивности напряжений на наружной (линия 1) и сопрягаемой (линии 2, 3) поверхностях ступицы. Линии 1, 2 соответствуют $\overline{\sigma}_i$ в первой фазе разборки КСН, а линия 3 соответствует $\overline{\sigma}_{ires}$, возникающей во второй фазе разборки соединения. Относительные напряжений при $p_{\Gamma} = 0$ значительно ниже этих напряжении при $p_{\Gamma} = p_{\Gamma \max}$ по всей длине ступицы за исключением ее торцевой части.

Определение НДС ступицы КСН экспериментальными методами

Прочность и величина остаточных деформаций ступицы накладывают определенные ограничения на применение СГР сборки-разборки КСН. Поэтому целью экспериментальных исследований НДС ступицы КСН являлось установление степени достоверности ее расчета с использованием математической моделей распределения гидростатического давления рабочего тела по длине КСН [6], а также установление допустимой величины радиального натяга.

Методика проведения испытаний. Конструкция образцов и схема наклейки датчиков представлены на рис. 7. Селективная сборка соединений обеспечивала точность суммарных угловых отклонений не хуже 7-го квалитета. Натяг определяли по изменению базорасстояния ступицы относительно вала. Сборку образцов СГР проводили с применением машины высокого давления (УНГР-2000), мультипликатора и гидродомкрата [3].

Отклонение формы сопрягаемой поверхности ступицы определяли обмером образцов в лабораторных условиях, а ее оценку проводили графическим методом [3]. Изменение формы сопрягаемой поверхности в торцевой части ступицы контролировали с использованием специальных конических калибров, изготовленных с учетом номинальных размеров торцевых диаметров сопрягаемых конических поверхностей.

Напряженное состояние ступицы фиксировали путем тензометрирования наружной по-



Рис. 7. Конструкция образцов и схема наклейки датчиков

верхности образцов с определением окружных ε_t и осевых ε_z деформаций. Переход от деформаций к напряжениям выполняли по зависимостям:

$$\sigma'_t = \varepsilon_t E; \ \sigma'_z = \varepsilon_z E.$$

Экспериментальные окружные и осевые напряжения, условно отнесенные к одноосному напряженному состоянию на поверхности ступицы:

$$\sigma_t = \frac{1}{1-\mu^2} \left(\sigma_t' + \mu \sigma_z' \right); \ \sigma_z = \frac{1}{1-\mu^2} \left(\sigma_z' + \mu \sigma_t' \right).$$

Приведенная методика справедлива при упругой деформации ступицы или, по крайней мере, ее наружной поверхности. В случае упругопластического деформирования уменьшение интенсивности напряжений при разгрузке $\sigma_{i pa3}$ пропорционально уменьшению интенсивности деформации $\varepsilon_{i pa3}$, причем коэффициент пропорциональности тот же, что и при условии упругого деформирования [8, 9]:

$$\sigma_{i \text{ pas}} = 3G\varepsilon_{i \text{ pas}},$$

где G — модуль сдвига.

Интенсивность остаточных напряжений после разгрузки определяли согласно "закону разгрузки" [8, 9] из выражения $\sigma_{ires} = \sigma_i - \sigma_{i \text{ pas}}$.

Исследования деформированного состояния ступицы заключались в определении остаточных деформаций ее сопрягаемой поверхности у торца ступицы и по ее длине в случае ее неравномерного автофретажа.

Результаты определения остаточных радиальных деформаций по длине сопрягаемой поверхности ступицы при деформировании материала с упрочнением представлены на рис. 8 и 9. Результаты представлены для точек плана (-; -), (-; 0), (-; +) (см. таблицу) в координатах $\overline{\delta}_{res}, \ \overline{\delta}_{res max}, \ \overline{\delta}$:

$$\overline{\delta}_{res} = \delta_{res}/\delta_{pl}; ; \overline{\delta}_{res\max} = \delta_{res\max}/\delta_{pl},$$

где δ_{res} , $\delta_{res \max}$ — текущая и максимальная (бочкообразность) величины изменения диаметра для сечений ступицы, вследствие ее остаточных деформаций; δ_{pl} — изменение диаметра, соответствующее возникновению пластических деформаций на сопрягаемой поверхности ступицы.

На рис. 8 для сечений ступицы с координатами *z/l* результаты экспериментальных исследований представлены доверительными интервалами ($\gamma = 0.95$), а расчетные значения результатами имитационного моделирования с учетом работ [5, 6]. При этом экспериментальные значения, полученные для сечений симметричных относительно средней части ступицы, объединяли в одну выборку. Это позволило нивелировать влияния некоторых технологических факторов на условия сборкиразборки КСН СГР, в том числе: конусности сопрягаемой поверхности; погрешности угла конуса; возможное смещение середины ступицы относительно подводящей канавки; изменение механических характеристик материала по длине ступицы.

Экспериментальные исследования позволили выявить общие закономерности формирования погрешности формы сопрягаемой поверхности вследствие неравномерного автофретажа ступицы. Полученные аппроксимирующие функции для полиномов различной степени имеют вид:

$$\overline{\delta}_{res}^{(2)}(\overline{z}) = 0,0118 + 3,87\overline{z} - 3,93\overline{z}^{2};$$

$$\overline{\delta}_{res}^{(3)}(\overline{z}) = 0,083 + 4,72\overline{z} - 5,77\overline{z}^{2} + 1,12\overline{z}^{3};$$



Рис. 8 Доверительные интервалы ($\gamma = 0.95$) экспериментальных значений и расчетные зависимости (МКЭ) относительных отклонений формы в сечениях ступицы (неравномерный автофретаж с аппроксимацией диаграммы деформирования по методу упругих решений): $a - \beta = 1.4; \varsigma = 0.571; \delta - \beta = 1.4; \varsigma = 0.714; e - \beta = 1.4; \varsigma = 0.857$

$$\overline{\delta}_{res}^{(4)}(\bar{z}) = 0,008 + 3,74\bar{z} - 2,19\bar{z}^2 - 3,79\bar{z}^3 + 2,24\bar{z}^4,$$

где $\overline{\delta}_{res}^{(i)}(\overline{z}) = \delta_{res}^{(i)}(\overline{z}) / \delta_{res \max}; i$ — степень полинома; $\delta_{res \max}$ — экспериментальное значение

максимальной бочкообразности сопрягаемой поверхности; $\overline{z} = z/l$.

Проверка адекватностей моделей $\overline{\delta}_{res}^{(2)}(\bar{z})$, $\overline{\delta}_{res}^{(3)}(\bar{z})$, $\overline{\delta}_{res}^{(4)}(\bar{z})$ по критерию Фишера [7] показала возможность использования для ин-



Рис. 9. Расчетные зависимости (МКЭ) и экспериментальные значения относительных максимальных отклонений формы:

 $I - \beta = 1,4; \ \varsigma = 0,571; \ 2 - \beta = 1,4; \ \varsigma = 0,714; \ 3 - \beta = 1,4; \ \varsigma = 0,857$

женерных расчетов полинома второй степени $\overline{\delta}_{reg}^{(2)}(\overline{z})$.

На рис. 9 представлены экспериментальные и расчетные значения $\overline{\delta}_{res \max}$ (бочкообразно-

сти) для сопрягаемой поверхности ступицы для различных значений $\overline{\delta}$. Парные линии 1, 2, 3 построены по результатам расчета [5, 6] и определяют "коридор" между экстремальными значениями бочкообразностей $\overline{\delta}_{res \max}$. При сравнении результатов рис. 9 очевидно проявляется влияние геометрических параметров ступицы на $\overline{\delta}_{res \max}$, кроме того, можно сделать заключение об адекватности предложенной математической модели расчета КСН при его сборке-разборке СГР, в достаточной для инженерных расчетов степени точности.

Исследования напряженного состояния ступицы проводили с целью установления по результатам тензометрирования наружной поверхности ступицы степени адекватности расчетной модели. На рис. 10 показано изменение относительной интенсивности напряжений $\overline{\sigma}_i$ на наружной поверхности ступицы при сборке КСН с увеличенными натягами СГР для различных сочетаний ее геометрических параметров.

Для различных сечений ступицы \bar{z} парами точек указаны доверительные интервалы ($\gamma = 0.95$) экспериментальных значений, а результаты расчета представлены графическими зависимостями. Сопоставление результатов позволяет сделать выводы об адекватности расчетной модели.



Рис. 10. Доверительные интервалы (γ = 0,95) экспериментальных значений и расчетные зависимости (МКЭ) изменений интенсивности напряжений на наружной поверхности ступицы при сборке СГР КСН с увеличенными натягами (неравномерный автофретаж с аппроксимацией диаграммы деформирования по методу упругих решений):

 $1 - \bigcirc -\overline{\delta} = 0,86; \ 2 - \spadesuit -\overline{\delta} = 1,11; \ 3 - \blacktriangle -\overline{\delta} = 1,39; \ a - \beta = 1,65; \ \varsigma = 0,83; \ \delta - \beta = 1,65; \ \varsigma = 0,5; \ e - \beta = 1,4; \ \varsigma = 0,83; \ \delta - \beta = 1,4; \ \delta = 0,4; \$



Выводы

1. Остаточные НДС, возникающие в торцевой части и по длине ступицы при сборкеразборке КСН СГР, могут быть определены МКЭ с использованием имитационной модели распределения давления рабочего тела по длине соединения [5, 6].

2. Погрешность формы сопрягаемой поверхности ступицы, возникающая вследствие ее неравномерного автофретажа при ГП СГР сборки-разборки КСН с увеличенными натягами, с достаточной для инженерных расчетов точностью, может быть представлена полиномом второй степени.

3. В исследуемом диапазоне типоразмеров КСН при их сборке-разборке СГР эффект Баушингера в ступице КСН не проявляется.

Библиографический список

1. Ильюшин А.А., Огибалов П.М. Упругопластические деформации полых цилиндров. М.: Изд-во МГУ, 1960. 257 с.

2. Высоконапряженные соединения с гарантированным натягом / И.В. Абрамов и др. Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2002. 300 с.

3. Гречищев Е.С., Ильяшенко А.А. Соединения с натягом: Расчет, проектирование, изготовление. М: Машиностроение, 1981. 247 с.

4. Заярный С.Л. Исследование несущей способности конических соединений с натягом, применяемых в локомотивостроении, при частичном упрогопластическом деформировании охватывающей детали: автореф. дис. ...канд. техн. наук. Брянск: Брянский институт транспортного машиностроения 1983.

5. Заярный С.Л., Ильяшенко А.А. Исследование гидропрессового способа сборки-разборки конических соединений с увеличенными натягами // Сборка в машиностроении и приборостроении. № 8. 2014.

6. Заярный С.Л. Имитационные модели гидропрессования конического соединения с гарантированным натягом // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана: электронный журнал. 2011. № 12. [Электронный ресурс]. URL: http://technomag.edu.ru/ doc/256412.html (дата обращения 20.12.2011).

7. Сидняев Н.И., Вилисова Н.Т. Введение в теорию планирования эксперимента: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 463 с.

8. **Марковец М.П.** Определение механических свойств металла по твердости. М.: Машиностроение, 1979. 192 с.

9. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1968. 400 с.

10. Безухов Н.Н. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1961. 512 с.

11. Расчеты машиностроительных конструкций методом конечных элементов: справочник / В.И. Мяченков и др.; под ред. В.И. Мяченкова. М.: Машиностроение, 1989. 520 с.



621.717

М.Н. Сорокин, *д-р техн. наук (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)),* **В.Е. Кулешов**, канд. техн. наук (ОАО "ОК-ЛОЗА"),

Ю.Н. Ануров (Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)) E-mail: Sorokin-mn@mail.ru; okloza@list.ru; ayn2001@mail.ru

Комплектование подшипников качения

Предложена схема комплектования подшипников качения, разработанная на базе теории комплектования, основой которой является задача Монжа—Канторовича.

The scheme of matching of rolling bearings developed on the basis of the theory of matching which foundation is Monge—Kantorovich's problem is offered.

Ключевые слова: селективная сборка, задача комплектования, комплектование подшипников качения, схема комплектования.

Keywords: selective assembly, matching problem, matching of rolling bearings, the scheme of matching.

Вопрос комплектования подшипников качения при их изготовлении всегда являлся актуальным. В последнее время многими авторами были предложены различные методы комплектования [1, 2].

В работе [1] было отмечено следующее: "Большой объем работ в области совершенствования процессов комплектования и сборки прецизионных изделий типа подшипников качения, скорее, показывает наличие нерешенных проблем, чем благополучное состояние вопроса. И основная проблема заключается в необходимости дальнейшего совершенствования *теоретических основ, математического* и программного обеспечения селективной сборки". Автор работы абсолютно прав.

В 1976 г. был предложен метод межгрупповой взаимозаменяемости для решения уравнения размерных цепей [3]. Задача комплектования при селективной сборке изделий позже была представлена как задача Монжа—Канторовича с индикаторной функцией стоимости [4, 5]. Были разработаны методы решения как для двухпараметрической, так и для трехпараметрической задач комплектования [6, 7]. Основы теории селективной сборки, базирующейся на задаче Монжа—Канторовича, были опубликованы в работе [8].

В данной работе предлагается метод комплектования подшипников качения, разработанный на базе теории комплектования, основой которой является задача Монжа—Канторовича.

Будем рассматривать допуски сопрягаемых параметров в относительной, нормированной системе полей допусков (рис. 1).

Введем необходимые определения и обозначения:

*r*₁ — диаметр дорожки качения наружного кольца;

 r_2 — диаметр дорожки качения внутреннего кольца;

 r_3 — диаметр шарика;

R — радиальный зазор в подшипнике качения.

Уравнение сопряжения имеет вид

$$R=r_1-r_2-2r_3$$

Рис. 1. Выборочные распределения сопрягаемых параметров и параметра сопряжения:

 $a - функция распределения f_1(j_1)$ числа наружных колец подшипника в зависимости от номера селективной группы j_1 ; $\delta - функция распределения f_2(j_2)$ числа внутренних колец подшипника в зависимости от номера селективной группы j_2 ; $e - функция распределения f_1(j_3)$ числа пар колец подшипника в зависимости от номера селективной группы j_3 ; $e - функция распределения f_1(j_3)$ числа шариков в выбранных селективных группах; $\partial - функция распределения f(j)$ числа скомплектованных подшипников в зависимости от значения радиального зазора R



В соответствии с теорией комплектования величины r_1 , r_2 , r_3 являются сопрягаемыми параметрами, а R — параметром сопряжения.

Разобьем поле допуска сопрягаемых параметров r_i , $i = \overline{1,2}$, параметра сопряжения R, т.е. отрезки [-1, +1], на нечетное число 2n + 1, а поле допуска сопрягаемого параметра r_3 , отрезок [-1, +1], на нечетное число 4n + 1 одинаковых по длине селективных интервалов. Пусть индекс j_i , $j_i = -\overline{n, + n}$, определяет номер селективного интервала сопрягаемого параметра r_i , $i = \overline{1, 2}$, индекс j, $j = -\overline{n, + n}$, — номер селективного интервала параметра сопряжения R, а индекс j_3 , $j_3 = -\overline{2n, +2n}$, номер селективного интервала сопрягаемого параметра r_3 (см. рис. 1).





 ${\rm B}_{r_1}, {\rm B}_{r_2}$ — бункеры, содержащие наружные и внутренние кольца подшипников; ${\rm M3}_{r_1}, {\rm M3}_{r_2}$ — измерительные позиции для определения диаметра дорожки качения наружного и внутреннего колец; ${\rm M}_1, {\rm M}_2, {\rm M}_3$ — магазины, в каждой ячейке которых находятся наружные, внутренние кольца и шарики определенных селективных групп; СК — позиция, где формируется сборочный комплект для сборки подшипника; СБ — узел сборки подшипника; ${\rm H}_{\rm n}$ — накопитель собранных подшипников; УУ — управляющее устройство; С_ш — склад хранения шариков Пусть $f_i(j_i)$ — функция распределения количества деталей *i*-го вида в j_i -й селективной группе, $j_i = -\overline{n, +n}$, $i = \overline{1, 2}$, $j_3 = -\overline{2n, +2n}$; f(j) функция распределения числа сборочных комплектов с параметром сопряжения R, принадлежащим *j* селективной группе, $j = -\overline{n, +n}$.

Условие, определяющее допуск параметра сопряжения *R*, запишем в номерах селективных групп:

$$n_1 \leq j_1 + j_2 + j_3 \leq n_2,$$
 (1)

где n_1 , n_2 — границы допуска параметра сопряжения R.

Предлагается следующая схема комплектования подшипников качения (рис. 2). Считаем, что наружные и внутренние кольца поступают для комплектования партиями. В каждой партии имеется N наружных и N внутренних колец. Также считаем, что имеется определенный запас шариков в определенных селективных группах.

Комплектование деталей подшипника происходит по этой схеме следующим образом.

В бункеры $Б_{r_1}$, $Б_{r_2}$ поступают партии наружных и внутренних колец по N штук в каждой. Затем наружные и внутренние кольца поступают на измерительные позиции $И3_{r_1}$, $I3_{r_2}$, где определяются значения диаметров дорожек качения.

На рис. 1, *а*, *б* представлены функции распределения числа деталей *i*-го вида в j_i -х селективных группах $f_i(j_i)$, i = 1, 2, $j_i = -n, +n$. Информация о значениях диаметров дорожек качения поступает в управляющее устройство УУ. На основании информации о диаметрах дорожек качения решается двухпараметрическая задача комплектования для наружных и внутренних колец методом полного целенаправленного суммирования, где параметром сопряжения является величина r, $r = r_1 - r_2$, или $j_3 = j_1 - j_2$, если ее рассматривать как числовой индекс.

На рис. 1, *в* функция распределения $f_{12}(j_3)$ определяет число пар колец (наружного и внутреннего) в j_i -й селективной группе для параметра сопряжения *r*. Номера селективных групп пар колец j_3 могут находиться в диапазоне $n'_1 \leq j_3 \leq n'_2$. Данные о функции распределения $f_{12}(j_3)$ поступают в управляющее устройство. Затем решается вторая задача комплектования. Целью этой задачи является определение номеров селективных групп шариков и количества шариков в каждой выбранной селективной группе, чтобы обеспечить выполнение условия (1). Номера селективных групп шариков j_3 могут находиться в диапазоне $n'_1 \leq j_3 \leq n'_2$. Эта задача комплектования решается в управляющем устройстве.

На рис. 1, ϵ представлена функция распределения $f_3(j_3)$ шариков в выбранных селективных группах как решение второй задачи комплектования.

Затем данные о необходимых для комплектования шариках поступают на склад $C_{\rm m}$, а оттуда нужные шарики поступают в магазин M_1 , где каждая ячейка определяет шарики одной селективной группы, выбранной ранее.

После этого управляющее устройство УУ из магазинов M_1 , M_2 , M_3 направляет на позицию СК наружное кольцо, внутреннее кольцо и шарики, для которых выполняется условие (1). На рис. 1, ∂ представлена функция распределения f(j) числа скомплектованных подшипников в зависимости от значения радиального зазора R.

Сборочный комплект сформирован и направляется на сборку СБ, а затем в накопитель для собранных подшипников H_{n} .

Таким образом, процесс комплектования подшипника происходит в два этапа: на первом определяются пары колец, а на втором — для них подбираются шарики. Представленный метод получения сборочных комплектов подшипников качения назовем *методом двойного комплектования*.

С точки зрения теории комплектования, базирующейся на задаче Монжа—Канторовича, решение задачи комплектования для схем комплектования, описанных в работе [1], осуществляется методом случайного поиска. Известно, что применение этого метода для решения детерминированных задач не дает точного решения и метод случайного поиска имеет низкую эффективность. Поэтому и создание автоматических устройств для комплектования и сборки подшипников на базе применения метода случайного поиска не является оптимальным решением. Особенностями метода двойного комплектования являются следующие:

задача комплектования решается на основе информации обо всех наружных и внутренних кольцах, поступивших для комплектования;

необходимо иметь запас шариков в определенных селективных группах;

число селективных групп шариков, необходимых для комплектования, существенно меньше, чем при комплектовании подшипника другими методами.

Достоинства предложенного метода двойного комплектования заключаются в следующем:

обеспечение полной собираемости партии деталей;

возможность сборки подшипников в "ноль", т.е. для j = const;

сведение к минимальному числа бракованных подшипников для данной партии деталей из-за погрешностей измерения сопрягаемых параметров.

Предложенный метод комплектования может быть применен для сборки изделий типа "подшипник" любой физической природы при условии, что для одного типа деталей допускается накопление.

В ОАО "ОК-ЛОЗА" метод двойного комплектования применяется для получения сборочных комплектов при сборке высокоточных подшипников.

Рассмотрим применение метода двойного комплектования на примере комплектования партии высокоточных радиально-упорных подшипников. Введем обозначения:

D — диаметр дорожки качения наружного кольца;

d — диаметр дорожки качения внутреннего кольца;

*d*_ш – диаметр шарика;

R — радиальный зазор в подшипнике качения.

Уравнение сопряжения имеет вид

$$R=D-d-2d_{\rm III}.$$

Пусть мы имеем следующие технологические данные для этого подшипника:

$$\begin{split} D &= 6, 2^{+0,009}_{-0,006}; \ d = 3,574^{+0,003}_{-0,012}; \\ d_{\rm III} &= 1, 3^{+0,025}_{-0,025}; \ R = 0,026^{+0,004}_{-0,001}. \end{split}$$





 $A - функция распределения <math>f_1(j_1)$ числа наружных колец подшипника в зависимости от отклонения диаметра дорожки качения; $\delta - функция$ распределения $f_2(j_2)$ числа внутренних колец подшипника в зависимости от отклонения диаметра дорожки качения; $\epsilon - функция распределения$ $f_{12}(j_3)$ числа пар колец подшипника в зависимости от отклонения D - d; $\epsilon - функция распределения f(j)$ числа подшипников в зависимости от отклонения радиального зазора R

Для комплектования поступили 149 наружных колец и 149 внутренних колец. Длина селективного интервала для всех сопрягаемых параметров подшипника выбрана равной мкм. Точность измерения 1 сопрягаемых параметров подшипника составляет ±0,5 мкм. Для данного примера значения отклонений от номинальных значений сопрягаемых параметров совпадают с номерами селективных групп сопрягаемых параметров.

Поле допуска диаметров дорожек качения разбито на 15 селективных интервалов. Наружные и внутренние кольца были измерены и распределены по селективным группам. Данные об измерениях представлены в табл. 1, 2.

На рис. 3, *a*, *б* представлены функции распределения числа колец в селективных группах $f_1(j_1), f_2(j_2).$

Для деталей с сопрягаемыми параметрами D и d была решена двухпараметрическая задача комплектования методом полного целенаправленного суммирования. Результатом комплектования стали пары колец, а сопряжением является разность диаметров дорожек качения D - d. В табл. 3 представлены зависимости числа пар колец в зависимости от отклонения величины D - d.

На рис. 3, e представлена функция распределения числа пар колец $f_{12}(j_3)$ в зависимости от отклонения (D - d). Затем решалась вторая задача комплектования — задача подбора шариков в целях обеспечения требуемого радиального зазора. Оказалось, что шариками из трех селективных групп

Число наружных колец в селективных группах

Отклонение D, мкм	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+2	+3	+4	+5	+6	+7	+8	+9
Число наружных колец, шт.	1	6	10	19	23	29	15	6	7	3	4	6	2	4	1

Таблица 2

Таблииа і

Число внутренних колец в селективных группах

Отклонение <i>d</i> , мкм	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
Число внутренних колец, шт.	7	8	2	11	6	14	9	13	20	19	9	12	4	8	4	3

	Таблица	3
Число пар колец в селективных группах		

Отклонение <i>D</i> – <i>d</i> , мкм	+3	+4	+5	+6	+7
Число пар колец, шт.	53	34	31	17	14

+1, +2, +3 можно обеспечить все пары колец, причем значения отклонения радиального зазора j будут равны +1 и +2 мкм. Получим 51 комплект подшипников с радиальным зазором +27 мкм и 98 комплектов с радиальным зазором +28 мкм.

На рис. 3, e представлена функция распределения f(j) числа подшипников в зависимости от радиального зазора R.

В ОАО "ОК-ЛОЗА" всегда имеется определенный запас шариков различных размерных групп, и задача комплектования была решена.

Выводы

1. Предложен метод двойного комплектования для комплектования подшипников качения, созданный на базе теории комплектования, основой которой является задача Монжа—Канторовича.

2. Для получения сборочных комплектов подшипников используется информация обо всех наружных и внутренних кольцах, поступивших для комплектования.

3. Данный метод требует определенного запаса шариков в выбранных селективных группах. 4. На базе метода двойного комплектования может быть создана установка для автоматической сборки подшипников.

Библиографический список

1. Королев А.В., Чистяков А.М., Королев А.А. Новые прогрессивные технологии машиностроительного производства. Ч. 1. Саратов: Изд. Саратовского государственного технического ун-та, 1997. 128 с.

2. Королев А.В., Королев А.А., Мухина Е.Б. Современный метод комплектования изделий типа подшипников качения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 1. С. 42—44.

3. Пупков К.А., Сорокин М.Н. Комплектование деталей при селективной сборке изделий // Межвузовский сб. статей. Вып. 12. М.: Изд. Всесоюзного заочного машиностроительного института, 1979. С. 89—93.

4. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011 № 8. С. 16—19.

5. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Алгоритм решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" по методу межгрупповой взаимозаменяемости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 9. С. 15—18.

6. Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А., Урманова Д.И. Математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 3. С. 40-43.

7. Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А. Метод перераспределения потока для решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 9. С. 7—13.

8. Сорокин М.Н. Алгоритмизация комплектования в системах управления технологическим процессом селективной сборки изделий: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. М.: 1989. 42 с.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ОСНАСТКА ДЛЯ СБОРКИ

УДК 621.789

А.В. Морозов, канд. техн. наук (Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина), Л.В. Федорова, д-р техн. наук (Московский ГТУ им. Н.Э. Баумана), Н.Н. Горев, Н.И. Шамуков (Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина) E-mail: alvi.mor@mail.ru

Исследование влияния режимов сегментной электромеханической закалки на формирование участков регулярной микротвердости

Отражены результаты исследования влияния режимов сегментной электромеханической закалки (ЭМЗ) на формирование участков регулярной микротвердости. Обоснованы геометрические параметры обрабатывающего инструмента.

The paper presents the results of studies on the effect of electromechanical hardening segment on the formation of a regular microhardness sites. It justifies the geometrical parameters of the machining tool.

Ключевые слова: сегментная электромеханическая закалка, микротвердость, соединения с натягом, сдвигоустойчивость.

Keywords: segment electromechanical hardening, microhardness connection with interference, shear resistance.

В машиностроении широко применяются соединения с натягом, сдвигоустойчивость которых непосредственно влияет на надежность машин в целом. В свою очередь на сдвигоустойчивость соединений с натягом влияют различные факторы, такие как: величина натяга, способ сборки, микрогеометрия поверхности контакта и др.

Одним из способов повышения нагрузочной способности соединений с натягом является

применение сегментной электромеханической закалки (ЭМЗ) [1—3] поверхности отверстия охватывающей детали (рис. 1).

Сущность данного способа заключается в создании на поверхности отверстия охватывающей детали с помощью ЭМЗ закаленных участков в виде сегментов. При поперечном методе сборки соединения с натягом в зоне контакта деталей происходит неравномерная деформация поверхностей ввиду неоднородной микротвердости, что сказывается на увеличении линии контакта и как следствие — повышении сдвигоустойчивости соединения [4, 5].

Рациональное чередование закаленных и незакаленных участков обеспечивает наилучшую сдвигоустойчивость соединения.

Твердость, глубина и ширина закаленных участков существенно влияют на сдвигоустойчивость соединения, полученного предложенным способом [1].



Рис. 1. Соединение вал—втулка со сквозными закаленными участками: a — расположение закаленных участков поверхности отверстия охватывающей детали; δ — разрез охватывающей детали по сечению А—А; e — схема деформаций сопрягаемых поверхностей втулки и охватывающей детали в результате сборки; 1 — втулка; 2 — охватывающая деталь; 3 — фасонный контактно-нагревающий инструмент

В свою очередь на указанные характеристики закаленных участков в большей степени оказывают влияние такие параметры, как геометрия обрабатывающего инструмента [6—8] и режимы обработки (сила тока, скорость перемещения инструмента).

С целью выявления оптимальных параметров геометрии поверхности упрочняющего инструмента и режимов обработки выполнены экспериментальные исследования, для которых были подготовлены образцы деталей из стали 45 и чугуна СЧ20 с диаметром отверстия d = 30 мм.

Схема обработки сегментной ЭМЗ и компоновка экспериментальной установки представлены на рис. 2 на стр. 2 обложки.

Для сегментной ЭМЗ отверстий образцов применяли инструменты, включающие шесть сегментов, отличающиеся друг от друга длиной линии контакта. Углы, образующие сегменты: $\alpha_1 = 20^\circ$; $\alpha_2 = 25^\circ$; $\alpha_3 = 30^\circ$, что соответствовало линиям контакта $l_1 = 5,2$ мм; $l_2 = 6,5$ мм; $l_3 = 7,9$ мм.

Режимы обработки: сила тока, А: 3500; 4000; 4500; скорость перемещения инструмента, мм/мин: 100; 150; 200 [1].

Из полученных образцов изготовлены микрошлифы для металлографических исследований, которые проводили на микроскопе МИМ-7, а замеры микротвердости — на ПМТ-3.

Измерения микротвердости по глубине зоны термического влияния показали, что в зоне упрочнения при всех режимах обработки происходит существенное увеличение микротвердости по сравнению с исходной структурой. При сегментной ЭМЗ на поверхности детали из стали 45 образуются две зоны, отличающиеся друг от друга степенью полноты фазовых превращений (рис. 4 на стр. 3 обложки).

Первая зона представляет собой мартенситную структуру с фрагментами троостита. Микротвердость зоны составляет 6200...7800 МПа; вторая зона — характерна для участков, нагретых ниже критических температур, где наблюдается повышенная неоднородность структуры, в ней наряду с мартенситом, содержащим менее 1 % углерода, образуется трооститноферритная сетка, которая на границе с исходной структурой переходит в ферритную, при этом микротвердость снижается до 2250 МПа. При электромеханической закалке чугуна, в свою очередь, происходят аналогичные фазовые превращения, что и при закалке стали. Однако ввиду большего электрического сопротивления нагрев поверхности чугуна происходит интенсивнее, за счет чего при одних и тех же режимах обработки чугун прокаливается на большую глубину. При этом упрочненный слой чугуна представляет собой мелкоигольчатый мартенсит с твердостью 8600...8900 МПа.

Таким образом, в результате проведенных опытов были получены графики, отражающие зависимость глубины упрочненных участков, полученных в результате сегментной электромеханической обработки, от геометрии инструмента и режимов обработки (рис. 5).

Анализируя полученные графические зависимости, следует отметить, что с увеличением силы тока и снижением скорости перемещения инструмента относительно обрабатываемой поверхности глубина упрочненных сегментов как у стального образца, так и у чугунного увеличивается. Сегменты с наибольшей глубиной закаленного слоя образуются при I = 4500 A и v = 100 мм/мин.

Зная площадь контакта инструмента с обрабатывающей деталью, можно привести полученные экспериментальные данные к более обобщенному виду, задавшись плотностью тока (рис. 6).

Ширина закаленного участка превышает длину линии контакта *l* сегмента с поверхностью обрабатываемой детали на величину Δl , что обусловлено рассеиванием теплового потока при ЭМЗ. Данная величина, как и глубина закаленного участка *h*, зависит от режимов обработки, следовательно, на основании экспериментальных данных можно определить ее как $\Delta l = (0, 3... 0, 35)h$ (рис. 7 на стр. 3 обложки).

Задавшись необходимой глубиной h закаленного сегмента, по графикам определяется необходимая плотность тока j и скорость обработки — v. Ширина закаленного сегмента определяется из выражения:

$$b = \frac{\pi d}{2n},$$

где *d* — диаметр отверстия в детали; *n* — число упрочненных сегментов.



Рис. 5. Графики зависимости глубины упрочненного сегмента стали 45 и чугуна СЧ20 от режимов обработки (для сегментов с линиями контакта): $a - l_1 = 5,2$ мм; $\delta - l_2 = 6,5$ мм; $e - l_3 = 7,9$ мм

При ширине закаленного сегмента *b* длина линии контакта упрочняющего элемента будет равна:

$$l=b-\Delta l.$$

Далее можно определить силу тока *I*, необходимую для данного вида обработки:

I = jn(la),

где *а* — ширина контакта упрочняющего элемента.

Таким образом, получена возможность для определения рациональных параметров геометрии рабочего инструмента и режимов сегментной ЭМЗ поверхностей отверстий охватывающей детали.



Рис. 6. Зависимость глубины закаленных участков от плотности тока *j* и скорости обработки v отверстия образца:

а — из стали 45; *б* — из чугуна СЧ20

Выводы

Исследовано влияние режимов сегментной ЭМЗ на формирование участков регулярной микротвердости, при этом микротвердость закаленных участков для стали 45 составила 6200...7800 МПа, а для чугуна СЧ20 — 8600...8900 МПа.

Получены зависимости глубины закаленных участков от плотности тока при различной скорости обработки. Установлено, что глубина закаленного участка чугуна СЧ20 на 5...10 % больше, чем у стали 45.

Определено, что ширина закаленного участка больше длины линии контакта упрочняющего инструмента с обрабатываемой деталью на величину $\Delta l = (0, 3...0, 35)h$, где h — глубина закаленного сегмента. Данный параметр следует учитывать при проектировании обрабатывающего инструмента.

Библиографический список

1. Морозов А.В., Шамуков Н.И., Горев Н.Н., Рахимов А.Н. Повышение качества неподвижных соединений типа "корпус—втулка" применением сегментной электромеханической закалки // Международный научный журнал. 2013. № 4. С 83—87.

2. Морозов А.В., Федотов Г.Д., Абрамов А.Е. Повышение нагрузочной способности соединений с натягом типа "втулка — корпус" объемным электромеханическим дорнованием // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2014. № 3. С. 125—133.

3. **Морозов А.В., Федотов Г.Д.** Разработка классификации процессов электромеханической обработки отверстий движущимся высокотемпературным полосовым источником // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3. С. 44—50.

4. Патент RU № 2501636. Способ сборки деталей с натягом / А.В. Морозов, Н.Н. Горев. Опубл. 10.12.2013. Бюл. № 35.

5. Патент RU № 2508974. Способ сборки деталей с натягом / А.В. Морозов, Н.Н. Горев. Опубл. 20.12.2013. Бюл. № 35.

6. Патент RU № 123368. Дорн для выборочной электромеханической закалки цилиндрических отверстий деталей / А.В. Морозов, Н.Н. Горев. Опубл. 27.12.2012. Бюл. № 36.

7. Патент RU № 123719. Дорн для выборочной электромеханической закалки цилиндрических отверстий деталей / А.В. Морозов, Н.Н. Горев, Рахимов А.Н. Опубл. 10.01. 2013. Бюл. № 1.

8. Патент RU № 2501614. Дорн для выборочной электромеханической закалки цилиндрических отверстий деталей / А.В. Морозов, Н.Н. Горев. Опубл. 10.03.2014. Бюл. № 7.

>0000**00**0000<



УДК 621.757

В.А. Паташов, Ю.З. Житников, д-р техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева) E-mail: freeman01@list.ru, kgta_tms@mail.ru

Обоснование предельной скорости подвода к узлу завинчивающего устройства без повреждения штифтовых отверстий на узле и штифтов на исполнительном органе устройства

Получены математические выражения для предельных режимов подвода к узлу завинчивающего устройства без повреждения их ориентирующих поверхностей.

The mathematical dependence of the rate of break-away multi-spindle spillovers, which guarantees the reliable removal of cartridges with threaded Cams with screwed studs.

Ключевые слова: математическая модель, предельная скорость, завинчивающее устройство.

Keywords: the mathematical model, the speed limit, the device is screwed.

В момент взаимной доориентации с узлом завинчивающее устройство своими штифтами может повредить штифтовые отверстия узла. Впоследствии это приведет к браку из-за некачественной сборки при подстановке узла к другому элементу изделия.

Найдем предельную скорость подвода шпильковерта к узлу, при которой при ударе штифтов о фаски резьбовых отверстий будут возникать только упругие деформации.

Воспользуемся теоремой об изменении главного вектора количества движения [1] механической системы в интегральной форме в проекции на ось, направленную по движению:

$$mV_1 - mV_0 = -\sum F_i^{\rm B} \Delta t, \qquad (1)$$

где *m* — масса многошпиндельного шпильковерта;

*V*₁, *V*₀ — соответственно конечная и начальная скорости движения;

 $\Sigma F_{j}^{\text{в}}$ — сумма внешних сил, действующих на систему в проекции на ось движения;

 Δt — промежуток времени движения.

Рассмотрим случай упругого удара.

При ударе учитывается только сила удара, а остальными силами из-за их малости можно пренебречь. Кроме того, скорость системы в конце удара равна нулю: $V_1 = 0$. Тогда выражение (1) можно записать следующим образом:

$$mV_0 = F^{\mathrm{yd}} \Delta t, \qquad (2)$$

где *F*^{уд} — сила удара.

В уравнении (2) неизвестны сила и время удара. Для исключения из уравнения (2) этих параметров выразим их через другие параметры. Можно утверждать, что работы сил удара и сил медленного взаимодействия поверхностей равны при их одинаковой деформации [2]. Следовательно,

$$A_{\rm yg} = A_{\rm ct},\tag{3}$$

где A_{yg} — работа силы удара, т.е. динамическая составляющая работы;

*А*_{ст} — статическая составляющая работы.

Считаем, что при ударе имеет место упругая деформация взаимодействующих поверхностей. При этом работа силы удара равна

$$A_{\rm yg} = F^{\rm yg} h^{\rm yg}, \tag{4}$$

где *h*^{уд} — величина упругой деформации при ударе.

Считаем, что деформации взаимодействующих поверхностей при ударе происходят равнозамедленно, поэтому

$$h^{\rm yd} = V_{\rm cp} \Delta t; \tag{5}$$

$$V_{\rm cp} = \frac{V_2 + V_0}{2},\tag{6}$$

где V_{ср} — средняя скорость соударения поверхностей. С учетом того, что скорость в конце удара взаимодействующих поверхностей равна нулю, выражение (5) примет вид

$$h^{\rm yd} = \frac{V_0}{2} \Delta t. \tag{7}$$

При медленном сжатии взаимодействующих поверхностей на них появляются напряжения смятия. Работа при медленном смятии поверхностей

$$A_{\rm cM} = F_{\rm cM} h_{\rm cM},\tag{8}$$

где $F_{\rm cm}$ — предельная сила смятия поверхностей; $h_{\rm cm}$ — величина упругого смятия.

При упругой деформации предельную силу смятия [3] находим из выражения

$$\sigma_{\rm cM} = \frac{F_{\rm CM}}{S_{\rm cM}} \leqslant \left[\sigma_{\rm cM}\right],\tag{9}$$

где $S_{\rm cm}$ — площадь смятия поверхностей;

σ_{см} — действующее напряжение в зоне взаимодействия поверхностей;

 $[\sigma_{cM}]$ — предельно допустимое напряжение.

Из выражения (9) найдем силу смятия:

$$F_{\rm CM} = \left[\sigma_{\rm CM}\right] S_{\rm CM}.$$
 (10)

Взаимодействие фаски резьбового отверстия с конечной поверхностью штифта с учетом малой длины взаимодействия в первом приближении можно рассматривать как взаимодействие двух цилиндрических поверхностей. Тогда площадь контакта

$$S_{\rm CM} = 2ab,\tag{11}$$

где *а* — полуось пятна контакта взаимодействующих поверхностей;

b — длина взаимодействия (фаски).

Полуось пятна контакта при взаимодействии цилиндрических поверхностей по внутреннему радиусу согласно теории Герца [3, 4], определяем из выражения

$$a = 1,522 \sqrt{\frac{qR_0R_{\rm III}}{E_{\rm rup}(R_0 - R_{\rm III})}},$$
(12)

где *q* — удельная нагрузка взаимодействующих поверхностей на единицу длины;

 R_0 — радиус поверхности фаски;

*R*_ш — радиус взаимодействующей поверхности штифта;

 $E_{\rm пр}$ — приведенный модуль упругости материалов штифта и узла.

Удельная нагрузка на единицу длины взаимодействия [3—5] имеет вид:

$$q = \frac{3P}{4b},\tag{13}$$

где *P* — сила взаимодействия контактируемых поверхностей.

В месте контакта возникают напряжения смятия, следовательно

$$P = F_{\rm cm}.$$
 (14)

Радиус условно цилиндрической поверхности фаски (рис. 1, *a*) имеет вид:

$$R_0 = r_{\rm cp}/\cos\varphi, \tag{15}$$

где *r*_{ср} — средний радиус фаски;

ф – угол наклона поверхности фаски.

Радиус условно цилиндрической поверхности штифта (рис. 1, б)

$$R_{\rm III} = R_{\rm cp}/\cos(\alpha/2), \tag{16}$$

где $R_{\rm cp}$ — средний радиус штифта; α — угол конуса штифта. Приведенный модуль упругости взаимодействующих материалов находим из выражения:

$$E_{\rm np} = \frac{2E_0 E_{\rm m}}{E_0 + E_{\rm m}}.$$
 (17)

Подставим в выражение (12) для полуоси пятна контакта выражения (10), (11), (13), (15)—(17), и, приводя силу смятия к перпендикулярности взаимодействующих поверхностей, получим:

$$a = 1,522 \sqrt{\frac{3[\sigma_{cM}] 2ab \frac{r_{cp}R_{cp}}{\cos\varphi\cos(\alpha/2)} (E_0 + E_{III})\sin\varphi}{2E_0 E_{III} \left(\frac{r_{cp}}{\cos\varphi} - \frac{R_{cp}}{\cos(\alpha/2)}\right)}}.$$
(18)



Рис. 1. Определение условного радиуса цилиндрической поверхности: *a* — фаски; *б* — штифта



Рис. 2. Определение упругой деформации поверхности фаски на узле

Возведем выражение (18) в квадрат и, разделив на *а*, получим:

$$a = 1,522^{2} \frac{3[\sigma_{\rm cm}]b \frac{r_{\rm cp}R_{\rm cp}}{\cos\varphi\cos(\alpha/2)} (E_{0} + E_{\rm m})\sin\varphi}{E_{0}E_{\rm m} \left(\frac{r_{\rm cp}}{\cos\varphi} - \frac{R_{\rm cp}}{\cos(\alpha/2)}\right)}.$$
 (19)

Учитывая геометрию взаимодействия фаски со штифтом, после преобразования найдем величину упругой деформации поверхностей (рис. 2):

$$R_{\rm III} = \sqrt{\left(R_{\rm III} - h_{\rm CM}\right)^2 + a^2};$$
 (20)

$$h_{\rm CM}^2 - 2R_{\rm III}h_{\rm CM} + a^2 = 0.$$
 (21)

Получим уравнения второй степени. Решением уравнения является только положительный корень, а именно:

$$h_{\rm CM} = R_{\rm III} + \sqrt{R_{\rm III}^2 - a}.$$
 (22)

Учитывая, что сила удара должна воздействовать перпендикулярно поверхности фаски, подставим в выражение (3) равенства работ силы удара и силы медленного нагружения взаимодействующих поверхностей выражения (4), (7), (8), (10), (11), (22), не подставляя из-за громоздкости выражение (19) для полуоси пятна контакта:

$$F^{\mathrm{y}\pi}\sin\varphi\frac{V_0}{2}\Delta t = \left[\sigma_{\mathrm{c}\mathrm{M}}\right]2ab\left(R_{\mathrm{III}} + \sqrt{R_{\mathrm{III}}^2 - a}\right). \tag{23}$$

Выделим из выражения (23) правую часть уравнения (2):

$$F^{\mathrm{y}\pi}\Delta t = \frac{4\left[\sigma_{\mathrm{CM}}\right]ab\left(R_{\mathrm{III}} + \sqrt{R_{\mathrm{III}}^2 - a}\right)}{V_0\sin\phi}.$$
 (24)

Подставив полученное выражение в правую часть уравнения (2), получим

$$mV_{0} = \frac{4[\sigma_{\rm cm}]ab(R_{\rm III} + \sqrt{R_{\rm III}^{2} - a})}{V_{0}\sin\phi}.$$
 (25)

Найдем предельную скорость опускания многошпиндельного шпильковерта к собираемому узлу, при которой при ударе на взаимодействующих поверхностях фаски резьбового отверстия и штифта возникли бы только упругие деформации [6]:

$$V_0 < \sqrt{\frac{4\left[\sigma_{\rm CM}\right]ab\left(R_{\rm III} + \sqrt{R_{\rm III}^2 - a}\right)}{m\sin\phi}}.$$
 (26)

С учетом выражений (15), (16) для радиусов окончательно запишем:

$$V_0 < \sqrt{\frac{4\left[\sigma_{\rm cm}\right]ab\left(\frac{R_{\rm cp}}{\cos\left(\alpha/2\right)}\sqrt{\frac{R_{\rm cp}^2}{\cos^2\left(\alpha/2\right)} - a}\right)}{m\sin\phi}}$$

При этом полуось пятна контакта взаимодействия поверхностей находится из выражения

$$a = 1,522^{2} \frac{3[\sigma_{\rm cm}]b \frac{r_{\rm cp}R_{\rm cp}}{\cos\varphi\cos(\alpha/2)} (E_{0} + E_{\rm III})\sin\varphi}{E_{0}E_{\rm III} \left(\frac{r_{\rm cp}}{\cos\varphi} - \frac{R_{\rm cp}}{\cos(\alpha/2)}\right)}.$$

Библиографический список

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

2. **Феодосьев В.И.** Сопротивление материалов. Л.: Наука, 1970. 544 с.

3. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

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

5. Автоматизация производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов / Ю.З. Житников и др.; под общей ред. Ю.З. Житникова. Ковров: Изд. КГТА, 2008. 616 с.

6. Воркуев Д.С., Миронова Е.А. Многошпиндельный гайковерт на основе муфт предельного момента, дифференциальных механизмов, механизмов свободного хода // Вестник РГАТУ, Рыбинск. 2014. С. 101–104.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

УДК 681.5.08

М.Г. Кристаль, *д-р техн. наук,* **Р.Н. Кулагин,** *канд. техн. наук,* **М.Д. Хорошевский, П.С. Иванков, Д.В. Ярошик** (Волгоградский государственный технический университет) *E-mail:* crysmar@mail.ru

Виброконтактное устройство для контроля диаметров токопроводящих деталей

Предложено измерять диаметры малых отверстий токопроводящих деталей путем создания автоколебаний измерительного щупа. Приведена конструкция нового измерительного устройства, содержащего счетный триггер, который меняет свое состояние при контакте измерительного щупа с той или иной поверхностью контролируемого отверстия. По команде триггера исполнительный механизм в виде электромагнита совершает автоколебания щупа, по частоте которых судят о величине контролируемого размера. Предложенное устройство может быть также использовано для измерения и наружных размеров деталей.

The paper proposed to carry out the measurement of small-diameter holes conductive parts by creating a self-oscillations of the probe. Shows the design of a new measuring device comprising counting trigger that changes the state of the probe in contact with the surface of a controlled opening. At the command of the trigger actuator in the form of a electromagnet performs oscillations of the probe, the frequency of which is judged on the value of controlled size. The apparatus can also be used for measuring the external dimensions and details.

Ключевые слова: виброконтактное устройство, контроль диаметров, токопроводящая деталь.

Keywords: vibratory contacting device, control the diameters, conductive parts.

Введение

В ряде изделий перед их сборкой по методу групповой взаимозаменяемости (с зазором или натягом) требуется контроль и сортировка размеров деталей на группы [1]. К таким изделиям относятся буровые коронки, оснащенные твердосплавными зубками [2]. Групповой допуск сопрягаемых поверхностей таких изделий достаточно мал (5...10 мкм), что требует высокой точности измерительных средств. Известны устройства для измерения диаметров отверстий гильз гидроцилиндров, позволяющие обеспечить высокую точность измерительных средств за счет специальной обработки сигналов индуктивных датчиков [3-6]. Особые трудности вызывает измерение диаметров отверстий, не превышающих 4...12 мм. В этом случае эффективно применение виброконтактных средств измерения [А.с. СССР № 446742, МПК⁶ G01B7/12 приоритет от 07.10.1969, БИ № 38 25.10.74; а.с. СССР № 947627, МПК⁶ G01B7/00, G01B7/28 приоритет от 15.09.1980, БИ № 28 30.07.82], когда в отверстие вводят измерительный щуп, совершающий колебания в пределах контролируемых поверхностей, и по изменению амплитуды этих колебаний судят о величине диаметра.

Недостатком таких устройств является то, что при измерении на выходе датчика формируется синусоидальный электрический сигнал постоянной частоты, амплитудное значение которого определяется с погрешностью отсчетного устройства, что определяет их низкую точность, неприемлемую для использования при контроле размеров сопрягаемых поверхностей описанных выше изделий.

Конструкция и принцип действия виброконтактного измерительного устройства

Предложено устройство, в котором диаметр цилиндрического отверстия токопроводящей детали оценивается не по амплитуде, с помощью вольтметра, а по изменяемой в зависимости от величины измеряемого размера частоте автоколебаний, создаваемых вибратором. Приведенная погрешность цифрового вольтметра B7-72 [9] имеет порядок 10^{-4} от измеряемого диапазона, тогда как порядок приведенной погрешности цифрового частотомера Ч3-84 [10] составляет $10^{-7}...10^{-8}$.

Устройство содержит (рис. 1) корпус *1*, вибратор *2* с измерительным наконечником *3*, электромагнит возбуждения колебаний *4*, упругую подвеску *5* и узел *6* измерения параметров колебаний вибратора, выполненного в виде счетного триггера *7*, общий провод которого соединен с измеряемой токопроводящей деталью *8*, электронных ключей прямого *9* и



Рис. 1. Измерительное устройство

обратного 10 хода якоря электромагнита возбуждения колебаний, выполненного в виде закрепленного в корпусе постоянного кольцевого магнита 11, внутри которого расположена с возможностью перемещения обмотка 12 якоря 13, связанного с корпусом упругой подвеской, и интегрирующих усилителей 14, 15. Прямой выход счетного триггера соединен с входом ключа прямого хода 9 и через интегрирующий усилитель 14 с началом обмотки 12 якоря 13. Инверсный выход счетного триггера соединен с входом ключа обратного хода 10 и через интегрирующий усилитель 15 с концом обмотки 12 якоря 13. На диэлектрическом штоке 16 установлен перпендикулярно его оси измерительный наконечник 3, выполненный токопроводящим и соединенный с входом счетного триггера 7. К инверсному же выходу триггера 7 подключен узел измерения параметров колебаний 6 вибратора, выполненный в виде цифрового частотомера.

Устройство работает следующим образом.

Для измерения диаметра D_i отверстия детали в нужном сечении наконечник 3 диаметра d (рис. 2) вводится в измеряемое отверстие детали 8, подключенной к общему проводу счетного триггера 7, на вход которого подается напряжение U_n , что обеспечивает формирование на одном из его выходов единичного сигнала. Единичный сигнал U_2 (рис. 3, δ) с прямого выхода триггера 7 поступает на вход ключа K_1 прямого хода якоря 13 электромагнита 4 возбуждения колебаний, при этом конец обмотки 12 коммутируется с общим проводом, и через интегрирующий усилитель 14 с началом обмотки 12 якоря 13 электромагнита возбуждения колебаний. Усиленный сигнал U'_2 , поступая на обмотку 12 якоря 13 электромагнита 4 возбуждения колебаний, находящегося в поле постоянного магнита 11, приводит якорь 13 в движение в прямом направлении под действием силы Ампера, что двигает в прямом направлении закрепленный на якоре диэлектрический шток 16 и установленный на нем наконечник 3 до касания с одной из



Рис. 2. Измерительный щуп для измерения диаметров отверстий

поверхностей измеряемой детали 8. В момент касания поверхности измеряемой детали, подключенной к общему проводу счетного триггера 7. происходит переключение его состояния, через малый промежуток времени переключения t_{Π} , на противоположное (рис. 3, *a*), в результате чего на прямом выходе формируется нулевой сигнал, что размыкает ключ К₁ прямого хода. В этот же момент на инверсном выходе триггера 7 формируется единичный сигнал U_3 (рис. 3, б), который поступает на вход ключа К₂ обратного хода, при этом начало обмотки коммутируется с общим проводом, и через интегрирующий усилитель 15 с концом обмотки 12 якоря 13 электромагнита возбуждения колебаний 4. Усиленный сигнал U'₃, поступая на

обмотку 12 якоря 13 электромагнита возбуждения колебаний, находящегося в поле постоянного магнита 11, приводит его в движение в обратном направлении под действием силы Ампера, что приводит в движение в обратном направлении закрепленный на якоре 13 диэлектрический шток 16 и установленный на нем наконечник 3 до касания противоположной поверхности измеряемой детали 8, что переключает триггер 7 в противоположное состояние, далее цикл повторяется. Таким образом, создаются автоколебания S(t) измерительного наконечника с периодом T_1 (рис. 3, *в*).

С уменьшением диаметра D_{i+1} отверстия детали 8 умень-



Рис. 3. Временные диаграммы работы виброконтактного измерительного устройства при измерении диаметра отверстия *D_i*:

a — сигналы на входе счетного триггера; б — сигналы на выходе счетного триггера; s — функция автоколебаний вибратора с измерительным щупом

шается время перемещения штока 16 электромагнита возбуждения колебаний 4, тем самым повышается частота переключений триггера 7, и, следовательно, частота возникающих при этом автоколебаний вибратора (рис. 4).

С увеличением диаметра детали 8 увеличивается время перемещения штока 16 электромагнита возбуждения колебаний 4 в пределах контактов измерительного наконечника с поверхностями измеряемого размера, тем самым уменьшается частота переключений тригге-







Рис. 5. Щуп для измерения наружных диаметров деталей

ра 7, и, следовательно, частота возникающих при этом автоколебаний вибратора, которая измеряется цифровым частотомером 6, соединенным с инверсным выходом счетного триггера 7, причем измерение переменной величины частоты автоколебаний вибратора позволяет измерять величину контролируемого диаметра детали, пропорциональную частоте автоколебаний вибратора. Поскольку погрешность частотомера ниже погрешности измерения амплитудного значения колебаний вибратора, такой подход позволяет выполнять измерение диаметров с более высокой точностью.

Предлагаемое устройство может быть использовано также для измерения наружного диаметра детали. В этом случае используется раздвоенный шариковый наконечник, который располагают в плоскости измеряемого сечения (рис. 5).

Предлагаемое устройство может быть использовано для контроля малых номинальных размеров при высоких квалитетах точности их изготовления.

Библиографический список

1. Пневматическое сортировочное устройство / К.Т. Чан и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 6. С. 14—16.

2. Кристаль М.Г., Гольцов А.С., Плешаков А.А., Полякова М.В. Устройство для контроля размеров сопрягаемых поверхностей при сборке коронок для перфораторного бурения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 3. С. 3–5.

3. А.с. SU 1580140 МПК G 01 В 5/08. Способ измерения диаметра отверстия детали / Кристаль М.Г., Кулагин Р.Н., Харькин О.С., Петров В.Н.; приоритет от 02.12.87. ВолгПИ 23.07.1990, БИ № 27.

4. Автоматизация измерения внутреннего диаметра длинномерных гильз гидроцилиндров / А.С. Гольцов и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 4. С. 12—14.

5. Измайлов А.Д., Плешаков А.А., Горелова А.Ю., Кристаль М.Г. Повышение точности измерения диаметров отверстий деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 5. С. 36—37.

6. Измайлов А.Д., Плешаков А.А., Горелова А.Ю., Кристаль М.Г. Способ измерения диаметра номинально цилиндрического отверстия и устройство для его осуществления // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 6. С. 7—9.

7. Заявка на полезную модель № 2015138331 РФ Виброконтактное измерительное устройство / Кристаль М.Г., Кулагин Р.Н., Иванков П.С., Хорошевский М.Д.; приор. от 08.09.2015.

8. Хорошевский М.Д., Ярошик Д.В., Иванков П.С., Кристаль М.Г. Виброконтактные измерительные средства для сортировки деталей перед селективной сборкой: сборник / Материалы IV междунар. научнотехн. семинара "Современные технологии сборки", Москва, 22—23 октября 2015 г.; под ред. И.Н. Зининой. М.: МГИУ, 2015. С. 75—80.

9. **Приборэлектро.** Каталог вольтметров [Электронный pecypc]. URL: http://www.priborelektro.ru/product/price/voltmetry-5/369.html (дата обращения: 28.09.2015).

10. **Приборэлектро.** Каталог частотомеров [Электронный pecypc]. URL: http://www.priborelektro.ru/product/price/chastotomery-38/420.html (дата обращения: 28.09.2015).

~~~~~

## В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 621.822.57

#### В.И. Шаломов, канд. техн. наук

(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет) E-mail: seu@knastu.ru

# Особенности методики расчета выходных характеристик шпиндельного узла на частично пористых газостатических опорах

Рассмотрены особенности авторской методики расчета выходных характеристик шпиндельного узла металлообрабатывающего станка с частично пористыми газостатическими опорами, в частности относительной нагрузки и коэффициента жесткости на шлифовальном круге. Представлен алгоритм расчета характеристик, на основе которого разработана программа для ПЭВМ.

The article discusses the features developed by the author methodology of calculation of output characteristics of the spindle unit of machine tools with partially porous gas-static bearings, in particular the relative load and stiffness on grinding wheel. The algorithm of calculation of characteristics on the basis of which developed a program for the PC.

**Ключевые слова:** методика расчета, шпиндельный узел, газостатические опоры, пористые вставки, выходные характеристики, алгоритм и программа расчета.

**Keywords:** the method of calculation, spindle assembly, gas-static bearings, porous insert, output characteristics, algorithm and calculation program.

Известно, что газовые опоры шпиндельных узлов металлообрабатывающих станков обладают относительно невысокой несущей и демпфирующей способностью. Традиционно эта проблема решается путем применения газостатических подшипников с питающими дроссельными отверстиями. Однако наибольшая эффективность достигается использованием газостатических опор с частично пористой стенкой вкладыша. Газостатический подшипник с пористыми вставками имеет, с одной стороны, повышенную несущую способность и жесткость, а с другой — приемлемый расход газовой смазки.

Совершенствованию выходных характеристик шпиндельных узлов (ШУ) на бесконтактных подшипниках уделяется большое и постоянное внимание в работе научно-исследовательской лаборатории высокоскоростных малоразмерных турбин Комсомольского-на-Амуре технического университета.

К выходным характеристикам шпиндельного узла относят нагрузку и жесткость, измеренные на консоли вала. В основе методики их расчета лежат два уравнения статики, представленные в работе С.А. Шейнберга [1].

Для иллюстрации методики расчета характеристик ШУ приведем схему с угловым смещением оси шпинделя под воздействием нагрузки на шлифовальном круге из работы [2] (рис. 1).

На схеме введены следующие обозначения: F — нагрузка на шлифовальном круге;  $Q_1$ ,  $Q_2$  — нагрузка (несущая способность) передней и задней опоры; y — угловое смещение консоли вала; x — расстояние от оси передней опоры до центра вала; a — раздвижка опор;



Рис. 1. Схема шпиндельного узла: 1 — передний подшипник; 2 — задний подшипник

 $e_1, e_2$  — эксцентриситеты в передней и задней опорах;  $L_1, L_2$  длина (удлинение) передней и задней опор; l — вылет шпинделя;  $\gamma$  — угол смещения оси вала в вертикальной плоскости.

В качестве радиальных опор *1*, *2* шпинделя рассматривали газостатические подшипники с пористыми вставками шпоночной формы.

Следуя работе [1], составим два уравнения статики:

сумму проекций сил на ось Ү

$$Q_1 - Q_2 - F = 0 (1)$$

и уравнение моментов относительно точки О

$$Q_1 l - Q_2 (a+l) - M = 0, (2)$$

где  $M = M_1 + M_2 + M_3$  — восстанавливающий момент от перекоса, равный сумме моментов переднего подшипника  $M_1$ , заднего подшипника  $M_2$  и подпятника  $M_3$ .

Из уравнений (1) и (2) следует:

$$F = Q_1 - Q_2;$$
  
$$Q_1 l = Q_2 (a + l) + M.$$

Исходя из соображения превалирующего влияния на выходные характеристики ШУ радиальных подшипников и приводя все величины к максимальной нагрузке передней опоры, запишем эти выражения в безразмерном виде:

$$\overline{F} = C_{Q_1} - C_{Q_2} \overline{L}_2 / \overline{L}_1;$$
(3)

$$C_{Q_1}\bar{L}_1 = C_{Q_2}\bar{L}_2\left(\frac{\bar{a}}{\bar{l}} + 1\right) + \frac{0,125}{(1 - \bar{p}_s)\bar{l}\,\bar{L}_1}\left(\bar{M}_1 + \bar{M}_2\right), \quad (4)$$

где  $\overline{F} = F / [(p_s - p_a) L_1 D]$  — относительная нагрузка на шлифовальном круге;

 $C_{Q_1} = Q_1 / [(p_s - p_a) L_1 D] -$ коэффициент не-

сущей способности передней опоры;

 $C_{Q_2} = Q_2 / [(p_s - p_a)L_2D]$  — коэффициент несущей способности задней опоры;

 $\overline{L}_1 = L_1/D$  — удлинение передней опоры;

 $\overline{L}_2 = L_2/D$  — удлинение задней опоры;

 $\overline{p}_s = p_a/p_s$  — относительное давление наддува газа;

 $\bar{l} = l/L_1$  — относительный вылет шпинделя;  $\bar{a} = a/L_1$  — относительная раздвижка опор;

 $\overline{M}_1 = M_1 / (R^3 p_s)$  — удельный момент передней опоры;

 $\overline{M}_2 = M_2 / (R^3 p_s)$  — удельный момент задней опоры;

*p<sub>s</sub>* — абсолютное давление наддува газа;

$$R = D/2$$
 — радиус подшипников.

Жесткость, измеренная на шлифовальном круге, определяется по формуле

$$k_F = dF/dy, \tag{5}$$

где *у* — смещение оси круга.

Представим уравнение (5) в безразмерном виде

$$k_F = \frac{\left(p_s - p_a\right)L_1 D}{c} k_{\overline{F}},\tag{6}$$

где  $k_{\overline{F}} = d\overline{F} / d\overline{y}$  — коэффициент жесткости;  $\overline{y} = y / c$  — относительное смещение оси шлифовального круга, c — средний радиальный зазор между шпинделем и подшипником.

Уравнения (3), (4) и (6) показывают, что для определения безразмерных выходных характеристик ШУ необходимо знать эксплуатационные параметры газостатических опор, значения которых полностью зависят от характера распределения давления газа в зазоре подшипников [3].

При воздействии нагрузки на шлифовальный круг происходит смещение оси вала на угол  $\gamma$ . Учитывая малое значение угла перекоса шпинделя  $\gamma$ , можно принять tg  $\gamma = \gamma$ . На основании этого абсолютные эксцентриситеты шпинделя в передней и задней опорах определюется по формулам

$$e_1 = x\gamma; \quad e_2 = (a - x)\gamma.$$

Отсюда получим

$$e_2 = a\gamma - e_1.$$

В безразмерных величинах последнее уравнение имеет вид

$$\varepsilon_2 = \overline{\gamma}_1 \frac{a}{R\overline{L}_1} - \varepsilon_1, \tag{7}$$

где  $\overline{\gamma}_1$  — параметр перекоса переднего подшипника.

Задаваясь начальным значением  $\varepsilon_1$ , при различных значениях параметра перекоса  $\overline{\gamma}_1$  определяются коэффициент несущей способности  $C_{Q_1}$  и удельный восстанавливающий момент  $\overline{M}_1$  передней опоры.

Параметр перекоса  $\overline{\gamma}_1$  изменяется от  $\overline{\gamma}_{1 \min} = \varepsilon_1 R \overline{L}_1 / a$ , что соответствует  $\varepsilon_2 = 0$ , до  $\overline{\gamma}_{1 \max} = 2 \varepsilon_1 R \overline{L}_1 / a$ , достигаемого при  $\varepsilon_2 = \varepsilon_1$ . По результатам расчетов находили зависимости  $\overline{M}_1 = f(\overline{\gamma}_1)$  и  $C_{Q_1} = f(\overline{\gamma}_1)$ .

Далее, при заданном относительном эксцентриситете  $\varepsilon_1$  и параметре перекоса  $\overline{\gamma}_1$  по формуле (7) определяли значение  $\varepsilon_2$  и проводили



расчет характеристик задней опоры — коэффициента несущей способности  $C_{Q_2}$  и удельного восстанавливающего момента  $\overline{M}_2$  при параметре перекоса  $\overline{\gamma}_2 = \overline{\gamma}_1 \overline{L}_2 / \overline{L}_1$ . По результатам серии расчетов при различных значениях  $\overline{\gamma}_1$  находили зависимости  $\overline{M}_2 = f(\overline{\gamma}_1)$  и  $C_{Q_2} = f(\overline{\gamma}_1)$ .

Таким образом, характеристики передней и задней опоры ШУ при  $\varepsilon_1$  = const становились зависящими только от величины параметра перекоса передней опоры  $\overline{\gamma}_1$ .



После задания какого-либо начального значения параметра перекоса  $\overline{\gamma}_1$ , решение уравнения (4) выполняли методом половинного деления с точностью расхождения его левой и правой частей не выше 1 %. Описанная процедура расчета характеристик опор для решения уравнения (4) позволила существенно сократить затраты машинного времени.

При известных значениях характеристик опор и угле перекоса  $\overline{\gamma}_1$  рассчитывали по формуле (3) значение  $\overline{F}$  безразмерной нагрузки на шлифовальном круге, а по уравнению

$$\overline{y} = \varepsilon_1 + l\overline{\gamma}_1 / \left(R\overline{L}_1\right)$$

— относительное смещение оси круга.

Затем задавали другое значение  $\varepsilon_1$ , и цикл расчета повторялся снова.

По результатам циклов расчета методом наименьших квадратичных отклонений определялась полиноминальная зависимость  $\bar{F} = f(\bar{y})$ , и по формуле

$$k_{\overline{F}} = df\left(\overline{y}\right)/d\,\overline{y}$$

находился коэффициент жесткости на шлифовальном круге.

Блок-схема расчета выходных характеристик шпиндельного узла показана на рис. 2. На ее основе разработана программа расчета для ПЭВМ.

#### Выводы

1. Развита методика и предложен алгоритм расчета выходных характеристик шпиндельного узла на частично пористых газовых опорах.

2. Разработана программа расчета характеристик ШУ на двухрядных газостатических опорах с пористыми шпоночными вставками на ПЭВМ.

3. Предложенная методика расчета характеристик опор позволила существенно сократить затраты машинного времени.

#### Библиографический список

1. Шейнберг С.А. и др. Опоры скольжения с газовой смазкой / под ред. С.А. Шейнберга. М.: Машиностроение, 1979. 336 с.

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

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

## ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 621.891:539.2

С.А. Поляков, д-р техн. наук (Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН), **Л.И. Куксенова**, д-р техн. наук, **И.С. Черторыльский** (Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН), С.П. Хазов (НПЦ "Конверс-ресурс", Москва) E-mail: serpol50@rambler.ru

### Повышение работоспособности опор скольжения на основе формирования у них адаптационных свойств при использовании пленкообразующих смазочных материалов

Приведена методика повышения показателей работоспособности опор скольжения для различных сочетаний конструкционных и смазочных материалов.

The methods of development of the indexes of function capability of sliding bearings for other combination of constructional materials and lubricants are presented.

Ключевые слова: опоры скольжения, адаптационная способность, пленкообразование.

Keywords: sliding bearings; adaptation capability; film-forming processes.

Формирование смазочной пленки в опорах скольжения при использовании нанодисперсных добавок к смазочному материалу позволяет расширить область допустимых эксплуатационных воздействий на эти узлы, повысив тем самым их работоспособность.

Одним из основных критериев работоспособности опор скольжения (ОС) является минимально допустимая толщина смазочной пленки [1, 2]. Для характеристики этой толщины устанавливают коэффициент запаса толщины пленки G<sub>h</sub>:

$$G_h = h_{\min}/h_r,$$

где  $h_{\min}$  — минимальная толщина смазочной пленки;

 $h_r = R_{z1} + R_{z2}$  — сумма высот шероховатостей вала и вкладыша.

Считается, что жидкостной режим трения существует в области  $G_h > 1$  [1, 2]. Именно эта величина предлагается в работе [2] в качестве

основного критерия работоспособности ОС. Таким образом, для расширения области реализации безопасного (как правило, жидкостного) режима смазывания необходимо увеличивать толщину смазочной пленки. Традиционные пути увеличения (подбор вязкостных свойств смазочного материала и конструкции узла трения) сегодня, в основном, исчерпали себя. Поэтому актуальной задачей является выбор новых способов повышения работоспособности ОС.

Обеспечение величины  $h_{\min}$  возможно с помощью пленкообразующих смазочных материалов [3, 4]. При этом процесс пленкообразования может сопровождаться формированием у сопряжения скольжения нового свойства склонности к адаптации [4], что является актуальным направлением для современного машиностроения. Формирование защитных пленок на поверхностях трения в результате действия смазочного материала давно используется в повышении задиростойкости, износостойкости и в целом триботехнической работоспособности сопряжений скольжения [5, 6].

В последние годы получили распространение некоторые минеральные добавки [7]. Например, некоторые минералы слоистого типа (графит, MoS<sub>2</sub> и др.) в высокодисперсном состоянии используются в качестве противоизносных присадок к смазочным материалам [7, 8]. Положительный эффект использования этих минералов обусловлен их способностью образовывать на поверхностях трения тонкие пленки, состоящие из чешуйчатых частиц, ориентированных параллельно поверхности трения и улучшающих их триботехнические свойства. Однако присадки на основе графита и MoS<sub>2</sub> обладают рядом недостатков, в частности, химической нестабильностью в определенных условиях, поэтому вопрос о замене такой присадки является актуальным [9, 10].

В качестве антифрикционного наполнителя для некоторых смазочных материалов возможно использование слоистых силикатов [11, 12]. Однако получаемая пленка, несмотря на присущие ей защитные функции, недостаточно адаптивна [12]. Кроме того, существует проблема использования таких составляющих слоистых силикатов, как асбестоподобные волокна, которые считаются экологически небезопасными.

Целью работы является оценка влияния пленкообразующих смазочных материалов на основе нанодисперсного полититаната калия на адаптационные свойства опор скольжения, позволяющие расширить область допустимых эксплуатационных воздействий на эти узлы, повысить их триботехническую работоспособность.

#### Методические основы исследования

Проблемы адаптивного пленкообразования связаны, в первую очередь, с качеством вводимой пленкообразующей добавки. Важно, чтобы ядра мицелл коллоидного раствора обладали наноразмерными масштабами, а сам раствор был достаточно устойчив [13]. В посвященной этой проблеме работе [14] данная задача не была до конца решена — уровень дисперсности оставался в диапазоне нескольких сотен нанометров. В связи с этим для повышения эффективности процесса пленкообразования предлагается проводить процесс диспергирования в технологической жидкости, содержащей ингредиенты, необходимые для процесса коллоидообразования, например, раствор олеиновой кислоты в спирте при разной ее концентрации, и контролировать процесс с помощью метода акустической спектроскопии, что позволяет проводить процесс практически в любой технологической жидкости.

Пример проведения диспергирования с мобильным контролем дисперсности методом акустической спектроскопии показан на примере образцов, которые представляли собой мелкодисперсный порошок полититаната калия белого цвета в растворителе. Состав суспензии: 10 г полититаната + 95 мл изопропилового спирта + 5 мл олеиновой кислоты. Суспензию обрабатывали ультразвуком с мощностью источника ультразвука 5 кВт в течение 10 мин. Полученный коллоидный раствор исследовали на предмет распределения частиц полититаната калия по размерам. По результатам исследования построено распределение частиц. Измерение выполнено методом акустической (ультразвуковой) спектроскопии с использованием прибора PA Fast Sizer — 100 (рис. 1).

Для улучшения процесса пленкообразования предлагается дополнительно вводить в получаемую суспензию пленкообразующие вещества, а также катализаторы, стимулирующие процесс пленкообразования. К таким веществам можно отнести, например эпоксидную смолу, введение которой в суспензию серпентина может осуществляться в растворе легкоиспаряющейся жидкости, например этилового спирта. Для ускорения процесса плен-



Рис. 1. Распределение частиц полититаната калия (ПТК) по размерам



кообразования в суспензию может также вводится катализатор. Для случая использования эпоксидной смолы таким катализатором может быть отвердитель, вводимый в смазочный материал также в растворенном виде. В случае использования других пленкообразующих веществ, например глицерина, который легко деструктирует при трении, образуя радикалы, в качестве катализатора используются соли жирных кислот, являющиеся классическими катализаторами процесса полимерообразования.

В качестве пленкообразующего вещества могут быть использованы различные углеводородные жидкости, в частности индустриальное масло, которое достаточно легко деструктирует в процессе трения, как это было показано в [15]. Получаемые в результате деструкции радикалы и комплексы под каталитическим воздействием наночастиц (серпентина, ПТК и др.) и солей жирных кислот могут образовывать достаточно эффективные противоизносные пленки, прочно хемосорбированные с металлической поверхностью трущейся детали. Моторные масла помимо углеводородов содержат также противоизносные присадки, содействующие пленкообразованию.

Для улучшения процесса коллоидообразования и последующего пленкообразования получаемая суспензия обрабатывается с помощью пропускания электрического тока с плотностью до 1 кВт/мм<sup>2</sup>. При напряжении до 10 000 В это приводит к возникновению на ядрах мицелл электрического заряда и повышению их адсорбционной способности по отношению к имеющимся в суспензии поверхностно-активным веществам — жирным кислотам и солям жирных кислот [16]. Исследовали масло M8 с добавкой нанодисперсного коллоидного раствора частиц полититаната калия (ПТК) в олеиновой кислоте с добавкой солей жирных кислот (СЖК), которое в таблице обозначено как M8 + ПТК + СЖК. Эту композицию сравнивали с чистым маслом M8, а также индустриальным маслом И-20А и таким же маслом с добавкой нанодисперсной суспензии серпентина в растворе солей жирных кислот И-20 + СС + СЖК.

Процесс получения пленки проверяли в ходе триботехнических испытаний по ГОСТ 23.224—86 при смазывании пар трения типа "диск — три пальца" (диск — сталь, пальцы — латунь). Испытания состояли в проведении приработки в режиме "на грани заедания", что позволило оценить максимальную несущую способность испытываемого сопряжения, а также скорость роста этой нагрузочной способности в процессе приработки.

#### Результаты исследования и их обсуждение

Качественное улучшение процесса пленкообразования позволило наблюдать новые синергетические эффекты при проведении триботехнических испытаний. При измерении износа методом профилографирования по ГОСТ 23.224—86 (прецизионный метод, обеспечивающий погрешность измерения износа не более 0,001 мкм) обнаружено не уменьшение размера изнашиваемой детали, как это всегда наблюдается при испытаниях на износ, а наоборот — наращивание материала, т.е. пленкообразование. Этот эффект иллюстрируют профилограммы, полученные до и после процесса пленкообразования и совмещенные

Основные показатели прирабатываемости и нагрузочной способности сопряжений для рассматриваемых смазочных композиций

| Состав               | Максималы<br>сопряжен | ная нагрузка<br>ния, МПа | Показатель прирабатываемости П<br>(скорость роста                                     | Нагрузка, соответствующая                             |  |  |
|----------------------|-----------------------|--------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|--|--|
| материала            | неприра-<br>ботанного | прира-<br>ботанного      | нагрузочной способности,<br><i>P</i> <sub>мп</sub> / <i>b</i> , МПа∙с <sup>-1</sup> ) | минимуму коэффициента<br>трения Р <sub>оп</sub> , МПа |  |  |
| И-20 + СС + СЖК      | 10                    | 30                       | 0,66 (0,15)                                                                           | 18                                                    |  |  |
| $M8 + \Pi TK + C KK$ | 10                    | 30                       | 0,66 (0,125)                                                                          | 20                                                    |  |  |
| M8                   | 12                    | 20                       | 0,4 (0,062)                                                                           | 12                                                    |  |  |
| И-20А                | 6 9                   |                          | 0,33 (0,05)                                                                           | 6                                                     |  |  |





Рис. 2. Профилограммы, полученные до испытаний и после испытаний на трение с процессом пленкообразования:

1, 2 — метки на трассе профилографирования, нанесенные микротвердомером; 3 — пленка на поверхности трения. Цифры у профилограмм (19.03) и (22.04) указывают даты, когда они были сняты (в промежутке между этими датами происходило испытание образца)

с помощью компьютерной обработки (рис. 2). По краям профилограмм расположены метки, размеры которых существенно превышают высоту шероховатости, в результате чего поверхности меток представлены, практически, вертикальными линиями.

На рис. 3 и 4 показан анализ полученной пленки с помощью сканирующего туннельного микроскопа. Он позволил выявить два дополнительных эффекта. Первый — высокая степень выглаживания поверхности трения (рис. 3). В левой части рисунка представлен скан поверхности трения, в котором высота рельефа показана цветом (основной вариант программы), а в правой части то же самое изображение представлено в объемном виде. При этом по всем трем осям (X, Y, Z) дана масштабная сетка, которая позволяет оценить как размер отсканированной площадки (1,24×1,24 мкм<sup>2</sup>), так и изменения высоты рельефа, составляющие сотые доли микрона. Эффект выглаживания подтверждается также профилографированием (см. рис. 2).

Второй эффект — наличие на поверхности трения вещества, механизм электрической проводимости которого отличен от механизма проводимости основного материала поверхности трения (стали) [13, 14]. Это наглядно видно из сопоставления двух вольт-амперных характеристик поверхности: до трения — линейный (рис. 4, a), и после трения — нелинейный, с возможностью оценить критическое значение напряжения, при котором возникает проводимость (рис. 4,  $\delta$ ). Изменение вида вольт-амперной характеристики прохождения тока через область контакта микрозонда с поверхностью образца указывает на возникновение в ряде областей трения при смазывании



Рис. 3. Сканы поверхности трения



Рис. 4. Вольт-амперные характеристики прохождения тока через область контакта микрозонда с поверхностью образца: *а* — до трения (линейная характеристика); *б* — после трения при смазывании нанодисперсным составом

композицией с нанодисперсным составом пленки, механизм проводимости которой отличен от металлического, так как требует для проводимости определенного порога напряжения. Таким образом, экспериментально подтвержден синергетический эффект, получаемый в результате использования предложенного состава. Он проявляется в формировании пленки, возникающей в процессе трения, из составляющих смазочной композиции и позволяющей компенсировать износ пары трения и существенно повысить ее несущую способность, что было подтверждено триботехническими испытаниями.

Результаты триботехнических испытаний и оценки триботехнических показателей представлены в таблице и на рис. 5. В таблице даны значения максимальной нагрузки для приработанного и неприработанного сопряжений *P*<sub>мн</sub> и *P*<sub>мп</sub>.



Рис. 5. График роста несущей способности сопряжений в зависимости от времени приработки (масштаб оси времени 1 = 50 с):

1 — чистое моторное масло M8; 2 — моторное масло M8 с суспензией ПТК и солями жирных кислот (M8 + ПТК + СЖК)

Кроме того, рассчитан показатель прирабатываемости  $\Pi = (P_{\rm M\Pi} - P_{\rm MH})/P_{\rm MH}$ , а также показатель скорости роста несущей способности  $P_{\rm M\Pi}/b$ , где b — временная характеристика кривой роста нагрузочной способности, c. В последнем столбце приводятся значения нагрузки  $P_{\rm on}$ , соответствующей критическому числу Зоммерфельда, минимально допустимой толщине смазочной пленки и минимуму коэффициента трения. Кинетика роста несущей способности от времени приработки получена по описанной выше методике и показана

на рис. 5. Рассмотренные показатели существенно возрастают после введения в смазочный материал модифицирующих добавок.

Важным показателем долговечности является нагрузка Роп, соответствующая критическому числу Зоммерфельда. При использовании пленкообразующих материалов величина Род существенно возрастает. Это приводит к смещению области критического перехода от гидродинамической к смешанной смазке в сторону большей грузоподъемности. При этом возрастание доли гидродинамической смазки при работе сопряжения ведет к соответствующему снижению интенсивности изнашивания, которая в условиях гидродинамической смазки падает практически до нуля. Поэтому разработка пленкообразующих смазочных материалов сегодня — эффективное направление трибологии, позволяющее существенно повысить ресурс многих машиностроительных конструкций [3, 4, 13].

В качестве примера можно рассмотреть возможность замены роликового радиальноупорного подшипника, используемого в качестве одной из опор червячного вала редуктора с нижним расположением червяка на подшипник скольжения с использованием наномодифицированного смазочного материала.

Для дополнительной оценки работоспособности подобного конструктивного решения может быть проведен расчет [17], предполагающий сравнение предельно допустимого износа сопряжения со значением износа, рассчитываемого как произведение заданного ресурса на интенсивность изнашивания сопряжения, причем последняя величина определяется экспериментально с воспроизведением эксплуатационных условий изнашивания.

Для определения интенсивности изнашивания исследовали поведение упорной (осевой) части подшипника, выполненного из латуни [3, 13]. По условиям эксплуатации именно эта составляющая радиально-упорного подшипника будет наиболее нагруженной, поэтому осевая сила на червячном валу равна окружной силе на червячном колесе и в рассматриваемом случае составляет 4 кН. Частота вращения червячного вала — 600 мин<sup>-1</sup>. Предельно допустимый износ определяли из условий выбора допустимого зазора в соответствующем радиально-упорном подшипнике (100 мкм для диаметра вала 40 мм).

По результатам экспериментов определяли несущую способность сопряжения: Р<sub>мп</sub> максимальную нагрузку приработки; Роп и нагрузку, соответствующую минимуму коэффициента трения при эксплуатационной частоте вращения. Они составили для сочетания сталь — латунь — индустриальное масло соответственно  $P_{\rm MII} = 9 \ {\rm MIIa}, \ P_{\rm OII} = 6 \ {\rm MIIa}, \ для \ того$ же сочетания с модифицированным маслом  $P_{_{\rm M\Pi}} = 30 \ {\rm M\Pi a}, \ P_{_{\rm O\Pi}} = 20 \ {\rm M\Pi a}.$  Поскольку осевая нагрузка на упорный подшипник составляла в эксплуатации 4 кН (или в пересчете на номинальное давление 5,2 МПа), то оба варианта оказываются принципиально допустимыми. Однако интенсивность изнашивания в условиях граничной смазки при смазывании маслом И-20А составила 6.10<sup>-9</sup>, при смазывании наномодифицированным маслом — 1.10<sup>-11</sup>. Соответственно при постоянной работе в условиях граничной смазки ресурс для первого случая составил 40 ч, для второго — 4000 ч.

Преимущество варианта с модифицированным маслом связано с уровнем прирабатывемости. Важным показателем прирабатываемости является величина  $P_{on}$ , определяющая критическое значение числа Зоммерфельда для перехода от гидродинамического режима к смешанной смазке при заданных значениях угловой скорости и вязкости масла. Определение этой величины регламентировано РД 50-662—88 и ГОСТ 23.224—86. Таким образом, для сопряжения с модифицированным смазочным материалом область перехода к граничной смазке лежит за пределами нагрузки 20 МПа, а такая нагрузка в эксплуатации заведомо невозможна по условиям работы. Для сопряжения с обычным индустриальным маслом эксплуатационная нагрузка близка к значению  $P_{0\Pi} = 6 \text{ M}\Pi a$ , в этом случае сопряжение работает преимущественно в условиях граничной и смешанной смазки, а значит, интенсивность изнашивания в эксплуатационных условиях будет порядка  $6 \cdot 10^{-9}$ , что следует считать неудовлетворительным. В то же время, для сопряжения с модифицированным маслом условия граничной смазки наступят лишь при нагрузке более 18 МПа, что невозможно, либо в переходный период, который должен составлять не более 10 % от общего времени работы. При максимально допустимом износе в 100 мкм и интенсивности изнашивания в условиях граничной смазки, общий ресурс сопряжения составит не менее 40 000 ч, что для данного узла является достаточно высоким показателем.

При подборе сочетаний конструкционных и смазочных материалов, особенно в случаях, когда работа составляемого из них сопряжения происходит в условиях смешанной смазки, необходимо стремиться к созданию условий для процесса пленкообразования на контактирующих поверхностях. Как правило, этот эффект достигается при использовании пленкообразующих смазочных материалов. Однако выбор среди смазочных материалов должен проводиться по результатам триботехнических испытаний с обязательным воспроизведением кинематики реального узла трения и определением таких показателей прирабатываемости, как П, Р<sub>мп</sub>, Р<sub>оп</sub>, причем последние два показателя должны сравниваться со значениями нагрузок, действующими в эксплуатации. После приработочных испытаний проводится оценка интенсивности изнашивания в стационарных условиях. При этом интенсивность изнашивания должна использоваться для расчета ресурса сопряжения с учетом реального режима эксплуатации, в первую очередь, режима нагружения и режима изменения скорости относительного скольжения, в том числе, периодичности и длительности режимов пусков и остановок.

Лабораторные испытания были дополнены натурными эксплуатационными испытаниями на двигателях легковых автомобилей ВАЗ для оценки эффективности наномодифицированных смазочных материалов [18, 19]. Эти испытания



позволили не только подтвердить расширение адаптационных свойств в смысле процесса пленкообразования, но продемонстрировать новые свойства у исследуемых в эксплуатации изделий (например, ДВС). По изменению давления сжатия в цилиндрах ДВС можно судить о степени изношенности соответствующего сопряжения (ГОСТ 23.224—86).

Испытания, диагностические работы на автомобилях ВАЗ 2013 и обработку двигателей по безразборной технологии нанодисперсным противоизносным составом с полититанатом калия проводили на испытательной базе НПЦ "Конверс-ресурс".

Для замера давления сжатия в цилиндрах использовали ручной прибор "MOTOMETER" с интервалом измерения от 0...17 бар с точностью 0,25 бар. Анализатор выхлопных газов ТЕХА-Редазо. Расход топлива определяли по длине контрольного пути в километрах по показанию штатного спидометра при кольцевом движении со скоростью 40...50 км/ч при выработке мерного количества топлива — 1 л.

Объекты испытаний:

Автомобиль ВАЗ. Двигатель ВАЗ 2011. Год выпуска 2003. Пробег к моменту обработки 40 000 км. Пробег после обработки 40 535 км. Пробег после восстановления трибосоставом с ПТК составил 535 км.

Показатели параметров двигателя:

| 1. Давление сжатия в 1   | цилинд   | рах до  | обра- |
|--------------------------|----------|---------|-------|
| ботки (контрольный замер | 0 - 28.0 | )5.2013 | г.):  |
| Номера цилиндров 1       | 2        | 3       | 4     |
| Давление сжатия          |          |         |       |
| по цилиндрам, бар 7,2    | 8,0      | 9,2     | 9,0   |

2. Давление сжатия в цилиндрах после обработки (контрольный замер — 4.06.2013 г.)

|                        |        |        |     | /    |
|------------------------|--------|--------|-----|------|
| Расход масла           |        |        |     |      |
| (по данным водителя).  | Сни    | изился |     |      |
| Расход топлива при гор | одском |        |     |      |
| режиме                 | Уме    | ньшил  | іся |      |
| Номера цилиндров       | 1      | 2      | 3   | 4    |
| Давление сжатия        |        |        |     |      |
| по цилиндрам, бар      | 8,0    | 10,0   | 9,8 | 10,1 |
|                        |        |        |     |      |

3. Пройденный путь, км, при мерном расходе топлива 1 л: До обработки ..... 6,8 После обработки трибосоставом с полититанатом и пробега 535 км ..... 7,8 Замеры выхлопных газов относятся к измерениям, осуществляемым в следующих условиях: температура жидкости охлаждения 70 °С; нагрузка — на холостом ходу (минимально возможная); частота вращения — 1000 мин<sup>-1</sup> (минимальная)

| Параметры                                | До<br>обработки | После<br>обработки |
|------------------------------------------|-----------------|--------------------|
| Путь, пройденный с НПС полититанатом, км | 0               | 535                |
| Дата измерения                           | 28.05.13        | 04.06.13           |
| Температура среды, °С                    | 30              | 28                 |
| Атмосферное давление, бар                | 1,017           | 1,009              |
| СО, % об.                                | 6,97            | 4,47               |
| СО <sub>2</sub> % об.                    | 8               | 9,9                |
| HC, млн <sup>-1</sup> об.                | 557             | 498                |

Замеры выхлопных газов осуществлены на горячем двигателе в условиях испытаний до обработки и после обработки и пробега 535 км при испытаниях на потребление горючего. Результаты свидетельствуют об уменьшении СО на 46 % и HC на 11 %.

#### Выводы

1. Получены подтверждения процесса пленкообразования на поверхностях трения в лабораторных триботехнических испытаниях благодаря использованию добавки к смазочному маслу коллоидного раствора полититаната калия.

2. Результаты лабораторных испытаний подтверждаются результатами эксплуатационных испытаний на двигателе внутреннего сгорания.

3. Полученные результаты показывают, что процесс пленкообразования позволяет получить у сопряжений свойство адаптивности к внешним воздействиям, что выражается в повышении прирабатываемости сопряжений и компенсации процесса изнашивания, в том числе при эксплуатационных испытаниях — в повышении компрессии и улучшении процесса сгорания при работе двигателя.

#### Библиографический список

1. Дьяков В.А., Воскресенский В.И. Расчет и проектирование опор скольжения (жидкостная смазка). М.: Машиностроение, 1980. 224 с.

2. Дьячков А.К. Гидродинамические подшипники // Трение, изнашивание и смазка: справочник. В 2 книгах. Кн. 2 / под ред. И.В. Крагельского и В.В. Алисина. М.: Машиностроение, 1979. С. 90—112.



3. **Критерии** работоспособности и выбор материалов для опор скольжения с учетом свойств смазочных материалов / С.А. Поляков и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2013. № 5. С. 81—89.

4. Поляков С.А., Куксенова Л.И. Проблемы динамической адаптации трибосистем к условиям эксплуатации на основе их наноструктурной самоорганизации // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 5. С. 80—90. 5. Барабаш М.Л., Корогодский М.В., Краюшки-

5. Барабаш М.Л., Корогодский М.В., Краюшкина А.С., Федотов Ф.А. Применение металлоколлоидных смазок (органзолей железа) для приработки деталей автомобильного двигателя // Повышение износостойкости и срока службы машин: сб. научн. тр. Т. 2. Киев: Изд-во АН УССР, 1960. С. 249—261. 6. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплаки-

6. Кужаров А.С., Онищук Н.Ю. Металлоплакирущие смазочные материалы // Долговечность трущихся деталей машин. М.: Машиностроение. 1988. Вып. 3. С. 96—143.

7. Паренаго О.П., Бакунин В.Н., Кузьмина Г.Н. Наноразмерные структуры в углеводородных смазочных материалах // Российский химический журнал. 2003. № 2. С. 45—50.

8. Методология создания смазочных материалов с наномодификаторами / М. Люты и др.// Трение и износ. 2002. № 4 (23). С. 411—424.

9. Гороховский А.В., Палагин А.И., Аристов Д.В. Субмикро- и наноразмерные титанаты калия и перспективы их применения // Нанотехника. 2010. № 4 (20). С. 90—94.

10. **Трибологические** свойства антифрикционных суспензий на основе нанопорошков полититаната калия / В.В. Сафонов и др. // Нанотехника. 2010. № 4 (20). С. 94—96.

11. Цыганок С.В., Лихтерова Н.М., Чулков И.П. Исследование влияния концентрации добавки геомодификатора — лизардита на трибологические характеристики смазки ЦИАТИМ-201 // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 8. С. 35—37. 12. Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Глазунова Е.А.

12. Долгополов К.Н., Любимов Д.Н., Глазунова Е.А. Трибохимия слоистых силикатов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 10. С. 15—19.

13. Поляков С.А., Хазов С.П., Соколов И.В., Зайцева К.В. Разработка нанодисперсных противоизносных составов для повышения динамической адаптации и эксплуатационных показателей дизель-генераторных установок // Нанотехника. 2008. № 4 (16). С. 50—56.

14. Поляков С.А., Черторыльский И.С., Куксенова Л.И. Влияние модифицирования смазочных материалов на триботехнические характеристики сопряжений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2012. № 6. С. 41—46.

15. Поляков С.А., Хазов С.П. О механизмах взаимодействия нанодисперсных частиц серпентина с жидким углеводородным смазочным материалом в начальный период трения // Нанотехника. 2007. № 3 (11). С. 98—105.

16. **Аулин В.В.** Влияние комбинированного физикохимического модифицирования моторного масла на изменение момента трения и потребляемой мощности в сопряжениях образцов и деталей // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 2. С. 21–28.

17. Дроздов Ю.Н., Юдин В.Г., Белов А.И. Прикладная трибология (трение, износ, смазка) / под ред. Ю.Н. Дроздова. М.: Эко-Пресс, 2010. 604 с.

18. Остриков В.В., Зимин А.Г., Попов С.Ю., Сафонов В.В. Многофункциональная добавка к моторным маслам // Двигателестроение. 2014. № 2(256). С. 32—34.

19. Перекрестов А.П., Чанчиков В.А., Гужвенко И.Н. Применение модифицированных смазочных материалов для повышения износостойкости деталей цилиндропоршневой группы судового дизеля // Вестник машиностроения. 2014. № 12. С. 57—59.



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



УДК 621.501

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

### Активное гашение вынужденных колебаний в системе с нелинейным демпфированием при действии импульсной возмущающей силы

Рассмотрена система с квадратичным трением при действии периодической импульсной возмущающей силы. Колебания в такой системе имеют негармонический характер. Для того чтобы уменьшить интенсивность этих колебаний, вводится силовое воздействие с обратной связью. Структура виброгасящей силы определяется с применением метода гармонической линеаризации.

The system with quadratic friction at action of periodic pulse disturbing force is considered. Oscillations in such system have a non harmonic character.

In order to decrease intensity of these oscillations is introduced force action a feedback. The structure of this extinguishing force is determined with application of harmonic linearization method.

**Ключевые слова:** квадратичное трение, импульсная возмущающая сила, негармонические колебания, воздействие с обратной связью, метод гармонической линеаризации, эффективность, установившаяся амплитуда.

**Keywords:** quadratic friction, pulse disturbing force, non harmonic oscillations, feedback force, harmonic linearization method, efficient, steady-state amplitude.

Рассмотрена одномассовая механическая система с турбулентным демпфированием, на которую действует симметричное импульсное периодическое возмущение.

Уравнение динамики системы имеет вид:

$$M\ddot{x} + Cx + a\dot{x}abs(\dot{x}) = F(t), \qquad (1)$$

где 
$$M\ddot{x}$$
 — инерционная сила;

M — масса системы;

 $\ddot{x}$  — ускорение;

Сх — упругая сила;

С — коэффициент упругости;

 $a\dot{x}abs(\dot{x})$  — сила турбулентного трения;

*а* — коэффициент пропорциональности силы турбулентного трения;

F(t) — симметричное импульсное периодическое силовое возмущение.

Уравнение (1) удобно преобразовать к виду:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \mu \dot{x} abs(\dot{x}) = f(t), \qquad (2)$$

где  $\mu = \frac{a}{M}; \ \omega_0^2 = \frac{C}{M}; \ f(t) = \frac{F(t)}{M}.$ 

График функции f(t) представлен на рис. 1 (B — амплитудное значение).

Если частота импульсного возмущения  $\omega = \frac{2\pi}{T} (T -$ период функции *f*(*t*)) близка к собственной частоте системы  $\omega_0$ , то в системе (2) возникают гармонические колебания высокой интенсивности.

В том случае, когда эти колебания являются нежелательными, для их компенсации, т.е. снижения их интенсивности до минимального допустимого уровня, в систему вводится силовое виброгасящее воздействие с обратной



Рис. 1. График функции f(t) при n = 4 (число циклов)

связью  $u(x, \dot{x})$ . При этом уравнение (2) трансформируется к виду:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \mu \dot{x} abs(\dot{x}) = f(t) - u(x, \dot{x}).$$
 (3)

В работе [1] предложены процедуры синтеза виброгасящих воздействий, оптимальных в гармоническом приближении и обеспечивающих минимальную амплитуду установившихся (квазигармонических) колебаний. Но даже в случае существенно негармонических (релаксационных) колебаний использование определенных на основе гармонических приближений виброгасящих приближений оказывается достаточно эффективным [2, 3].

Наряду с исходной системой (3) с импульсным возмущением рассматривали аналогичную систему с гармоническим возмущением:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \mu \dot{x} \operatorname{abs}(\dot{x}) = B \sin \omega t - u(x, \dot{x}).$$
(4)

Для системы оптимальное (в гармоническом приближении) виброгасящее воздействие [1], обеспечивающее минимальную амплитуду колебаний, при ограничении на его амплитуду

$$\operatorname{abs}(u(x, \dot{x})) \leq U,$$
 (5)

где *U* — заданная константа, определенная по формуле:

$$u_{l}^{*}(x, \dot{x}) = U \operatorname{sign}\left[\left(\omega_{0}^{2} - \omega^{2}\right)x + \mu_{l}A_{l}^{*}\frac{\dot{x}}{\omega}\right], \quad (6)$$

где  $\mu_1 = \mu \frac{8}{3\pi} \omega^2$ ;  $A_1^*$  — минимальная амплитуда

колебаний, рассчитанная по формуле

$$A_{l}^{*} = \sqrt{-\frac{\left(\omega_{0}^{2} - \omega^{2}\right)}{2\mu_{l}^{2}}} + \sqrt{\left(\frac{\left(\omega_{0}^{2} - \omega^{2}\right)}{2\mu_{l}^{2}}\right)^{2}} + \left(\frac{B - \frac{4}{\pi}U}{\mu_{l}}\right)^{2}.$$
 (7)

При ограничении на интегральное квадратичное значение виброгасящего воздействия

$$\int_{0}^{\frac{2\pi}{\omega}} u^2(x, \dot{x}) dt \leq V,$$
(8)

где *V*— заданная константа, соответствующий закон виброгашения определяется по формуле:

$$u_{2}^{*}(x, \dot{x}) =$$

$$= \frac{\sqrt{\pi\omega V}}{D^{*}} \left[ \left( \omega_{0}^{2} - \omega^{2} \right) x + \mu_{1} A_{2}^{*} \frac{\dot{x}}{\omega} \right], \qquad (9)$$



Рис. 2. Результаты действия импульсной возмущающей силы без (U = 0) и с виброгасящим воздействием (U > 0) при  $\omega_0 = 1$ ;  $\mu = 0,2$ ; B = 1:  $a - \omega = 0.8$ ;  $\delta - \omega = 0.9$ ;  $e - \omega = 1,1$ 



силы без (V = 0) и с виорогасящим воздеиствием (Vпри  $\omega_0 = 1$ ;  $\mu = 0,2$ ; B = 1:  $a - \omega = 0,9$ ;  $\delta - \omega = 1,1$  где  $A_2^*$  — минимальная амплитуда колебаний, определяемая по формуле:

$$\begin{cases} A_2^* = \sqrt{-\frac{(\omega_0^2 - \omega^2)}{2\mu_1^2} + \sqrt{\left(\frac{(\omega_0^2 - \omega^2)}{2\mu_1^2}\right)^2 + \left(\frac{B - \sqrt{\frac{\omega V}{\pi}}}{\mu_1}\right)^2}; (10) \\ D^* = \sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2) + (\mu^1 A_2^*)^2}. \end{cases}$$

На рис. 2 представлены результаты решения уравнения (3) для следующих значений параметров  $\omega_0 = 1$ ;  $\mu = 0,2$ ;  $\mu = 1,0$ ;  $\tau = 0,1$  для различных значений частоты возмущения  $\omega$  при виброгасящем воздействии  $u(x, \dot{x}) = u_1^*(x, \dot{x})$ , определяемом по формуле (6) и различных значениях его амплитуды *U*.

На рис. 3 приведены аналогичные графики для различных частот  $\omega$  и интенсивности возмущения *V* в случае, когда виброгасящее воздействие  $u(x, \dot{x}) = u_2^*(x, \dot{x})$  определяется по формуле (9).

#### Выводы

1. Для виброгашения негармонических колебаний в рассматриваемой системе использованы законы виброгашения с обратной связью, синтезированные исходя из первого гармонического приближения.

2. Использование этих законов позволяет эффективно снижать амплитуду установившихся колебаний.

#### Библиографический список

1. **Израилович М.Я.** Активное виброгашение вынужденных квазигармонических колебаний нелинейных систем. М.: URSS. 2010. 170 с.

2. **Израилович М.Я.** Активное гашение релаксационных автоколебаний // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2012. № 11. С. 43—45.

3. **Израилович М.Я., Эрлих Б.М.** Активное гашение периодических колебаний в системах с нелинейным демпфированием. М.: Изд-во Спутник. 2015. 38 с.

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) 268-48-97. Технический редактор Патрушева Е.М. Корректор Сажина Л.И. Сдано в набор 10.12.2015. Подписано в печать 01.02.2016. Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: www.aov.ru Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.