

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ
ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИИ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

3

2014

(164)

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Шижкарев М.П., Ву Тьен Зунг. Практическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с переменным значением коэффициента усиления 3

Современные технологии сборки

Ковалев В.Г. Совместимость сборочных операций электромонтажа накруткой и бандажирования накруткой 8

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Иванов А.А. Логистическая задача распределения грузов с помощью транспортных роботов 12

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Золотарев Ю.Н. Прогнозирование качества собираемой авиационной конструкции 15

Тымчик С.Г. Погрешности сборки когерентных оптических спектроанализаторов 19

В помощь конструктору, технологу

Денисов Ю.В., Капленко М.В. Улучшение процесса сборки прецизионного интегрирующего акселерометра 24

Осипович Д.А., Ярушин С.Г., Червоных С.А. Анализ направлений модернизации методики определения фактической площади проходного сечения соплового аппарата по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS 29

Розинев А.Я., Шатилов В.А., Логунов В.В. Оценка целесообразности изменения последовательности сборки и сварки монтажных соединений тонколистовых судовых конструкций 35

Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А., Урманова Д.И. Математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" 40

Разное

Козлов А.А., Смоленцев В.П., Клименченков А.А. Нанесение информации растровым инструментом на детали с эластичным диэлектрическим покрытием 44

Председатель редакционного совета
Ф.М. МИТЕНКОВ, академик РАН

Редакционный совет

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

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК
Ю.Н. КУЛЬЧИН, д.т.н., чл.-кор. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.
В.М. КОРНИЕНКО, к.т.н.

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

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

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОЛОМНА
Ю.Д. АМИРОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ
Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

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

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

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

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
В.Ф. КУЗЬМИН, к.т.н.
Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОЛЬЯТТИ
А.И. РЫЖКОВ, к.т.н.

ТУЛА
В.В. ПРЕЙС, д.т.н., проф.

ХАБАРОВСК
В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.

Украина

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

ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

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

Беларусь

МИНСК
В.Л. БАСИНЫК, д.т.н.
М.Л. ХЕЙЦЕЦ, д.т.н., проф.

ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

ИЗРАИЛЬ
В.М. БЕДРИН, инж.

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Ю.А. ЧИЧОВ, И.М. ГЛИКМАН

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

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

Тел.: (499) 268-38-42; тел./факс: 268-85-26. Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: sborka@mashin.ru

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.

THE MONTHLY
NEWSMAGAZINE
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

THE MAGAZINE IS PUBLISHED UNDER THE PATRONAGE OF INTERNATIONAL UNION OF MECHANICAL ENGINEERS
THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY AAC RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

3 2014
(164)

CONTENTS

Production tools and machinery for assembly

Shishkarev M.P., Vu Tien Zung. Practical accuracy of the adaptive response of frictional coupling with variable value of coefficient strengthening 3

Modern technologies in assembly

Kovalev V.G. Compatibility assembly operations wiring wire wrapping and banding wire wrap. 8

Feeding of assembly lines. Packaging arrangement. Stocking. Packing

Ivanov A.A. The logistical task of the distribution of cargo using transport robots 12

Quality assurance. Testing. Monitoring

Zolotarev Yu.N. Extrapolation the quality of the aviation construction in assembly. 15

Tymchik S.G. Coherent optical spectrum analyzer assembly faults 19

Industrial and design engineer's aid

Denisov Yu.V., Kaplenko M.V. Assembly process optimization for precision integrating accelerometer 24

Osipovich D.A., Jarushin S.G., Chervonnyh S.A. Analysis of improvement paths of measurement technique for set of nozzles actual open flow area based on data from digitizing using optical measurement system ATOS 29

Rozinov A.Ya., Shatilov V.A., Logunov V.V. Assessment of the feasibility of changing the sequence of assembly and welding installation of joints of thin-walled vessel structures 35

Sorokin M.N., Koltunov I.I., Sazonov D.A., Urmanova D.I. A mathematical formulation of the matching problem of the selective assembly of products type "bearing" 40

Different

Kozlov A.A., Smolentsev V.P., Klimenchenkov A.A. Marking of information by the raster-type instrument on details with elastic dielectric coating 44

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

Editors

MOSCOW

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

A.V. MEDAR'
E.A. MIKRIN
V.V. POROSHIN
B.V. SHANDROV
A.A. SHATILOV
A.G. KHOLODKOVA
G.A. YARKOV

Regional editors

BELGOROD

N.A. PELIPENKO

BRIANSK

O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA
V.M. KORNIENKO

VOLGOGRAD

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

IZHEVSK

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

KAZAN

R.I. ADGAMOV

KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

KOLOMNA

Yu.D. AMIROV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN
V.I. SCHPORT
A.M. SHPILEV

NABEREZHNYE CHELNY

S.V. DMITRIEV
R.M. KHISAMUTDINOV

NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

OMSK

V.N. KOSTIUKOV

OREL

Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

ORENBURG

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

RYBINSK

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

SAMARA

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

ST.-PETERSBURG

V.F. KUZMIN
E.V. SHALOBAEV

TULA

V.V. PREYS

TOLIATI

A.I. RYZHKOV

KHABAROVSK

V.A. LASHKO

Ukraine

KIEV

A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK

A.N. MIKHAILOV

SEVASTOPOL

E.L. PERVUKHINA

Belarus

MINSK

V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ

GOMEL

V.E. STARZHINSKI

ISRAEL

V.M. BEDRIN

POLAND

P.LEBKOVSKI
E. LUNARSKI

Executive editors of current issue:

Yu.A. CHICHOV, I.M. GLIKMAN

The journal is registered by RF Ministry of Press,
Tele-radio Broadcasting
and Mass Communications Media.
Registration certificate ПИ № 77-1747,
February 25, 2000 Free price

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

УДК 621.825.54

М.П. Шишкарёв, д-р техн. наук, Ву Тьен Зунг

(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: shishkarevm@mail.ru

Практическая точность срабатывания адаптивной фрикционной муфты с переменным значением коэффициента усиления

Разработана методика определения перегрузки в адаптивной фрикционной муфте первого поколения с переменным значением коэффициента усиления. Показано, что практическая точность срабатывания муфты больше единицы, и приближается к единице при уменьшении коэффициента трения.

Development of methods for determining the overload size in the adaptive friction coupling of the first generation with a variable value of the gain. It is shown that the practical accuracy of the adaptive coupling of the first generation with variable value of coefficient strengthening is greater than one, and is closer to unity of reducing the coefficient of friction.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, коэффициент усиления, коэффициент трения, точность срабатывания.

Keywords: adaptive friction coupling, coefficient strengthening, coefficient of friction, accuracy of the response.

Введение

Адаптивные фрикционные муфты (АФМ) применяют как предохранительные устройства для ограничения нагрузок, действующих в сборочных приспособлениях и в автоматических сборочных комплексах. Повышение стабильности рабочих нагрузок в этих механизмах позволяет повысить надежность и качество сборки.

Созданный вариант АФМ первого поколения с переменным значением коэффициента усиления (КУ) обратной связи теоретически обладает точностью срабатывания "идеальной" АФМ [1, 2]. Переменное значение КУ получается за счет изменения угла давления тела качения управляющего устройства (УУ) в зависимости от передаваемой нагрузки.

Для получения переменного значения КУ в АФМ была изменена конструктивная схема УУ [1].

Однако проведенные экспериментальные исследования натурального образца АФМ с переменным КУ показали, что муфта не обладает точностью срабатывания, присущей "идеальной" АФМ. Поскольку экспериментальные исследования проводили в статическом режиме нагружения на установке с укороченной кинематической цепью, т.е. с плавным увеличением нагрузки (время наступления полной перегрузки, приводящей к срабатыванию АФМ, больше, чем период собственных колебаний системы), влияние неучтенных динамических нагрузок практически исключалось.

Задача данного исследования — установление практической точности срабатывания АФМ первого поколения с переменным КУ.

Проведение исследования

Объект исследования — АФМ первого поколения с переменным значением КУ — представлен на рис. 1 принципиальной схемой.

Муфта состоит из полу муфт 3 и 8, связанных между собой пакетом фрикционных дисков 5. Вращающий момент между полу муфтами передается через УУ, включающее тела качения 4, расположенные в гнездах опорного диска 2, и подвижной вдоль своей оси втулки 1.

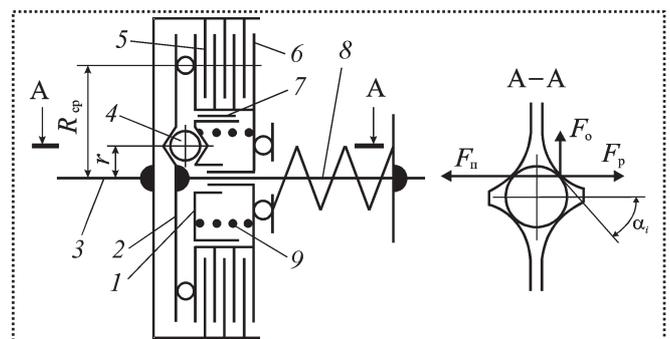


Рис. 1. Принципиальная схема АФМ с переменным КУ

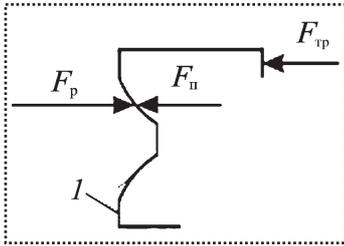


Рис. 2. Схема сил, действующих на опорную втулку 1

Втулка размещена в центральном отверстии нажимного диска 6 и связана с ним направляющей шпонкой 7. Между втулкой и нажимным диском поставлена с начальным натяжением пружина 9. Нажимной диск не имеет непосредственной кинематической связи с полумуфтой 8. Образующая профиля поверхностей гнезд диска 2 и втулки 1 представляет кривую линию в соответствии с закономерностью изменения угла давления α_i между телом качения и стенкой гнезда (рис. 1, сечение А–А).

При работе АФМ осевое положение втулки 1 зависит от внешней нагрузки и определяется текущим равенством действующих на нее осевых сил.

Уравнение осевого равновесия опорной втулки 1, согласно схеме сил, изображенных на рис. 2, имеет вид:

$$F_p - F_n - F_{тр} = 0, \quad (1)$$

где F_p – текущая распорная сила между телами качения 4 и опорной втулкой 1 (см. рис. 1);

F_n – текущая сила натяжения пружины 9;

$F_{тр}$ – сила трения между нажимным диском 6 и направляющей шпонкой 7.

В отличие от первых двух членов уравнения (1) сила $F_{тр}$ принята изменяющейся по линейному закону в функции вращающего момента АФМ. Коэффициент трения между нажимным диском и направляющей шпонкой, согласно данным работы [4], считаем постоянным.

В уравнении (1) члены можно представить как

$$F_p = \frac{T_{ном}}{r} = \operatorname{tg} \alpha_i; \quad F_n = c_0 x_i; \quad F_{тр} = \frac{2T_{ном}}{d} f_1, \quad (2)$$

где $T_{ном}$ – номинальный вращающий момент АФМ;
 r – радиус окружности, на которой расположены тела качения 4;

α_i – текущий угол давления между телом качения 4 и стенкой гнезда;

c_0 – осевая жесткость пружины 9;

x_i – текущая абсцисса точки контакта между телом качения 4 и стенкой гнезда;

d – диаметр центрального отверстия нажимного диска 6;

f_1 – коэффициент трения между нажимным диском 6 и направляющей шпонкой 8.

Подставляя правые части формул (2) в уравнение (1), получаем

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{c_0 x_i r}{T_{ном}} + \frac{2r f_1}{d}. \quad (3)$$

Проинтегрировав эту функцию, находим:

$$y_i = \frac{c_0 r}{2T_{ном}} x_i^2 + \frac{2r f_1}{d} x_i + C, \quad (4)$$

где C – постоянная интегрирования, определяемая из начальных условий: $y = y_0$ при $x = 0$. Тогда $C = y_0$ (y_0 – начальная ордината образующей гнезда, которая определяется по схеме, изображенной на рис. 3). Согласно схеме получаем

$$y_0 = \frac{D}{2} \cos \alpha_{\min} = \frac{D}{2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{\min}}}, \quad (5)$$

где D – диаметр тела качения.

Тогда соотношение (4) можно записать в следующем виде:

$$y_i = \frac{c_0 r}{2T_{ном}} x_i^2 + \frac{2r f_1}{d} x_i + \frac{D}{2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{\min}}}. \quad (6)$$

Номинальный вращающий момент АФМ вычисляют согласно работе [3] при минимальном значении коэффициента трения:

$$T_{ном} = z F_n R_{cp} \frac{f_{\min}}{1 + z C_{\min} f_{\min}}, \quad (7)$$

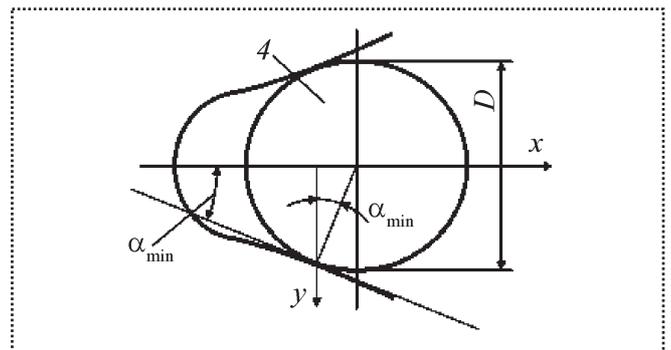
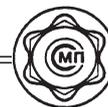


Рис. 3. Расчетная схема определения начальной ординаты образующей y_0



где z – число пар трения основной фрикционной группы (ОФГ);

R_{cp} – средний радиус поверхностей трения дисков 5;

f_{min} – минимальное значение коэффициента трения;

C_{min} – минимальное значение КУ.

Для установления зависимости $C(f_i)$ воспользуемся условием, согласно которому текущее значение вращающего момента АФМ при любом f_i остается постоянным, и должно быть равно номинальному вращающему моменту муфты.

Приравнявая друг другу правые части соотношения

$$T_n = zF_n R_{cp} \frac{f_i}{zC_i f_i}$$

и соотношения (7), получим уравнение, решение которого имеет следующий вид:

$$C_i = \frac{f_i - f_{min} + zC_{min} f_i f_{min}}{z f_{min} f_i} \quad (8)$$

С другой стороны, $C_i = \frac{R_{cp}}{r} \operatorname{tg} \alpha_i$, поэтому из выражения (8) получаем

$$\operatorname{tg} \alpha_i = \frac{r(f_i - f_{min}) + zC_{min} f_i f_{min}}{R_{cp} z f_{min} f_i} \quad (9)$$

Из соотношений (3) и (9) находим:

$$x_i = \frac{T_{ном}}{c_0} \left(\frac{f_i - f_{min} + zC_{min} f_i f_{min}}{R_{cp} z f_{min} f_i} - \frac{2f_i}{d} \right) \quad (10)$$

Подставив выражение (10) в формулу (6), получим:

$$y_i = \frac{rT_{ном}}{2c_0} \left(\frac{f_i - f_{min} + zC_{min} f_i f_{min}}{R_{cp} z f_{min}} - \frac{2f_i}{d} \right)^2 + \frac{2rT_{ном} f_1}{dc_0} \left(\frac{f_i - f_{min} + zC_{min} f_i f_{min}}{R_{cp} z f_{min} f_i} - \frac{2f_i}{d} \right) + \frac{D}{2\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha_{min}}} \quad (11)$$

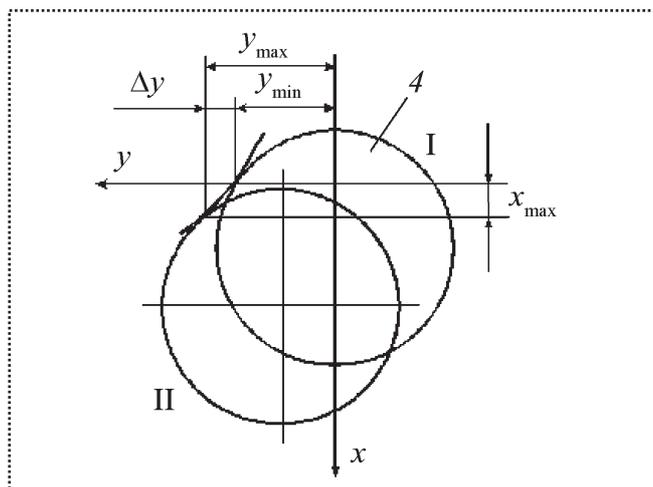


Рис. 4. Схема перемещения тела качения

Перегрузку в зависимости от коэффициента трения определяют в следующем порядке. Если втулка 1 (рис. 1) перемещается направо, то пружина 9 нажимает на диск 6 и возникает дополнительная нагрузка.

На рис. 4 показан процесс перемещения тела качения 4 (номер позиции сохранен в соответствии с рис. 1) при автоматическом регулировании.

Положения I и II тела качения соответствуют работе АФМ при минимальном и максимальном значениях коэффициента трения. Ось абсцисс x проходит через центр тела качения, ось ординат y – через точку контакта боковой стенки гнезда и тела качения.

В указанном положении I начальная ордината точки контакта равна y_{min} , и положению II тела качения соответствует ордината точки контакта y_{max} .

Обозначим

$$\Delta y = y_{max} - y_{min} \quad (12)$$

Подставляя соотношения (5) и (6) в равенство (12), получаем

$$\Delta y = \frac{rT_{ном}}{2c_0} \left(\frac{f_{max} - f_{min} + zC_{min} f_{max} f_{min}}{R_{cp} z f_{min} f_{max}} - \frac{2f_1}{d} \right)^2 + \frac{2rT_{ном} f_1}{dc_0} \left(\frac{f_{max} - f_{min} + zC_{min} f_{max} f_{min}}{R_{cp} z f_{min} f_{max}} - \frac{2f_1}{d} \right)$$

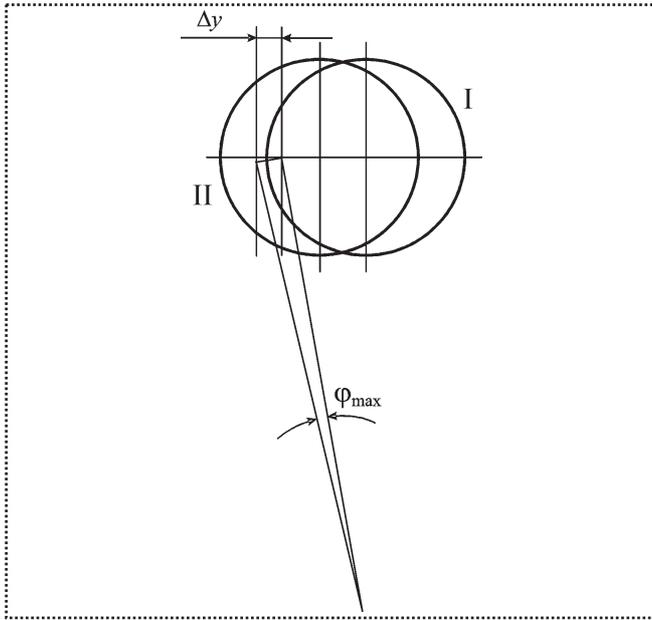


Рис. 5. К определению относительного закручивания полумуфты АФМ

Рассмотрим схему, изображенную на рис. 5. Положения I и II на рис. 5 соответствуют аналогичным положениям тела качения на рис. 4.

Перемещение тела качения из положения I в положение II приводит к относительному закручиванию полумуфты АФМ на угол φ_{\max} . Производя геометрические построения на рис. 5, найдем

$$\frac{\Delta y}{2r} = \sin \frac{\varphi_{\max}}{2}. \quad (13)$$

Откуда

$$\varphi_{\max} = 2 \arcsin \frac{\Delta y}{2r}$$

или с учетом выражения (12)

$$\begin{aligned} \varphi_{\max} = 2 \arcsin & \times \\ & \times \left[\frac{T_{\text{ном}}}{4c_0} \left(\frac{f_{\max} - f_{\min} + zC_{\min} f_{\max} f_{\min}}{R_{\text{ср}} z f_{\min} f_{\max}} - \frac{2f_1}{d} \right)^2 + \right. \\ & \left. + \frac{T_{\text{ном}} f_1}{dc_0} \left(\frac{f_{\max} - f_{\min} + zC_{\min} f_{\max} f_{\min}}{R_{\text{ср}} z f_{\min} f_{\max}} - \frac{2f_1}{d} \right) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Используя основную идею метода энергетического баланса, запишем:

$$A_{\tau} = P_{\text{пр}} + A_{\text{тр}}, \quad (15)$$

где A_{τ} – работа вращающего момента;

$P_{\text{пр}}$ – потенциальная энергия пружины 9;

$A_{\text{тр}}$ – работа против сил трения.

В уравнении (15) члены можно представить как

$$A_{\tau} = \frac{\Delta T}{2} \varphi_{\max}; \quad (16)$$

$$A_{\text{тр}} = 2 F_{\text{тр}} x_{\max} = \frac{2 \Delta T}{d} f_1 x_{\max}; \quad (17)$$

$$P_{\text{пр}} = \frac{c_0 (2x_{\max})^2}{2} = 2c_0 x_{\max}^2, \quad (18)$$

где ΔT – перегрузка, т.е. максимальный прирост внешней нагрузки.

Используя соотношения (10), (14)–(18), найдем выражение для вычисления перегрузки ΔT , связанной с увеличением коэффициента трения и наступлением общей перегрузки в приводе машины:

$$\Delta T = \frac{4dc_0 x_{\max}^2}{d \varphi_{\max} - 4f_1 x_{\max}}. \quad (19)$$

Практический коэффициент точности АФМ может быть вычислен по формуле

$$K_{\tau} = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} = \frac{T_{\text{ном}} + \Delta T}{T_{\text{ном}}} = 1 + \frac{\Delta T}{T_{\text{ном}}}. \quad (20)$$

Очевидно, что значение K_{τ} будет приближаться к единице, если уменьшается вращающий момент ΔT .

Способы уменьшения перегрузки

Поскольку значение вращающего момента $T_{\text{ном}}$ при расчете и проектировании АФМ является исходной величиной и ее задают как некоторую функцию различных эксплуатационных факторов (номинальная мощность привода машины, место установки АФМ в кинематической цепи привода и т.п.), то оно считается постоянным.

Рассмотрим возможность уменьшения величины ΔT за счет изменения значения x_{\max} . Обратимся к соотношению (10). Уменьшение значения x_i и, в частности, x_{\max} возможно за счет увеличения осевых жесткостей c_0 . В соотношении (19) получаем, что вращающий момент ΔT уменьшается при увеличении c_0 .

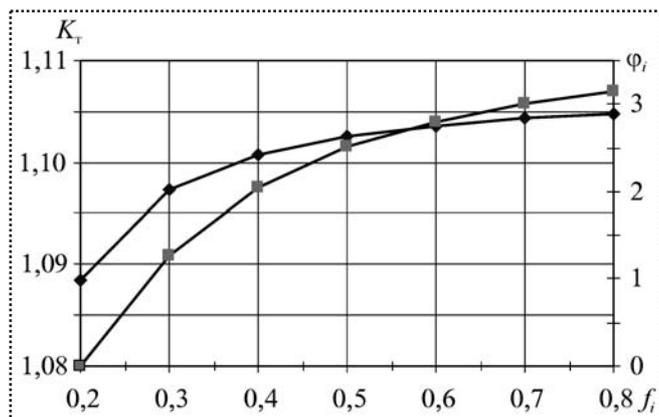


Рис. 6. Зависимость коэффициента точности K_t (◆) и угла закручивания полумуфты φ_i (■) от коэффициента трения f_i

Зависимости $K_t(f_i)$ и $\varphi_i(f_i)$ показаны на рис. 6. При вычислении φ_{\max} использовано соотношение (13), в котором, в свою очередь, величину y_{\max} вычисляли по соотношению (10), без учета в нем последнего слагаемого. В данном случае приняты следующие исходные данные: $r = 0,03$ м; $D = 0,016$ м; $z = 6$; $R_{cp} = 0,1$ м; $f_{\min} = 0,2$; $f_{\max} = 0,8$; $T_{ном} = 16$ Н·м и $F_{п} = 366$ Н.

Кривая $K_t(f_i)$ построена с использованием соотношения (20). Кривая $\varphi_i(f_i)$ построена с использованием соотношения (14).

Выводы

1. Разработана кинематическая схема возникновения перегрузок при работе АФМ первого поколения с переменным КУ.

2. Причиной возникновения перегрузок при работе АФМ с переменным КУ являются дополнительные затраты энергии, необходимые для перемещения тел качения относительно боковых стенок гнезд УУ.

3. С увеличением коэффициента трения f_i (от 0,2 до 0,8) перегрузка ΔT повышается от нуля до максимального значения.

4. Максимальная перегрузка при работе АФМ возникает при максимальном значении коэффициента трения, если изначально работа муфты происходила при минимальном значении коэффициента трения.

5. Коэффициент точности АФМ увеличивается от 1 до 1,105 при повышении коэффициента трения от минимального до максимального значения.

Библиографический список

1. Шишкарёв М.П. Математические модели высокой надежности адаптивных фрикционных муфт // Математические методы в технике и технологиях: Сб. тр. XVI Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. / Под общ. ред. В.С. Балакирева. Ростов н/Дону: РГАСХМ ГОУ, 2003. С. 231–234.
2. Шишкарёв М.П. Адаптивные фрикционные муфты. Исследование, конструкции и расчет. Ростов н/Д: Изд-во РГАСХМ, 2002. 228 с.
3. Шишкарёв М.П. Эффективность применения адаптивных фрикционных муфт // Изв. вузов. Машиностроение. 2001. № 1. С. 27–31.
4. Шишкарёв М.П. Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 2. С. 13–15.

ООО "Издательство Машиностроение" продолжает подписку на журнал "СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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



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

107076, г. Москва, Стромьинский пер., д. 4,

Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98, факс: (499) 269-48-97

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

УДК 621.396.6.002.72

В.Г. Ковалев, д-р техн. наук

(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)

Тел. (499) 263-61-45

Совместимость сборочных операций электромонтажа накруткой и бандажирования накруткой

Представлены результаты исследования возможности совместного бездефектного выполнения электромонтажных операций накрутки и бандажирования накруткой. Актуальность исследования обусловлена необходимостью обеспечения надежности и долговечности этого типа соединения. С этой целью приведены расчетные параметры для указанных процессов, определены их соотношение и граничные значения геометрических параметров.

The results of the research capabilities of the joint defect-free performance of wiring operations wrapping and banding wire wrapping was presented. Topicality of the research is driven by the need to ensure the reliability and durability of this type of connection. With this purpose, the estimated parameters for the specified processes, defined them and defined the boundary values of geometrical parameters.

Ключевые слова: актуальность, накрутка, бандажирование, совместимость, предельные напряжения, соотношение, допустимая величина, диаметр, поперечный размер, штырь-вывод.

Keywords: relevance, cheat, banding, compatibility, maximum voltage, ratio, permissible value, diameter, transverse size pin-conclusion.

Сборочные операции "накрутка" и "бандажирование накруткой" уже много лет применяют в производстве электронных изделий, поскольку в этом случае достигается высокая степень надежности изготовленных изделий. Однако при этом должны быть исключены процессы пайки из-за обязательного нагрева мест соединения с использованием припоя, флюса и необходимости отмывки-очистки мест пайки от оксидов и остатков флюса.

Накрутка – это способ электрического монтажа, при котором оголенный или частично оголенный обычно одножильный монтажный провод с

определенным растягивающим усилием наматывают на штырь-вывод (рис. 1), имеющий прямоугольное поперечное сечение с острыми ребрами в местах пересечения поверхностей сторон. При этом штырь-вывод врезается с обязательным незначительным пластическим деформированием в накручиваемый провод. В таких условиях получают герметичный контакт штыря-вывода с проводом, обеспечивающий многолетний надежный контакт этих элементов.

Бандажирование – это способ электрического монтажа, при котором вывод навесного элемента (или проводник) прижимается проводником накрутки к штырю-выводу (рис. 2). Проводник накрутки и в этом случае находится под действием растягивающего напряжения, создающего также незначительное пластическое деформирование поперечного сечения накручиваемого проводника с обеспечением герметичного контакта поверхностей проводника накрутки, вывода и бандажируемого элемента.

Выполнение бандажирования накруткой имеет особенности, отличающие его от накрутки. Существенное значение этого процесса для обеспечения качества монтажного соединения обуславливает необходимость всестороннего его исследования. При этом должны быть решены конструкторско-технологические вопросы, обоснованы соотношения ширины штыря-вывода и диаметра выво-

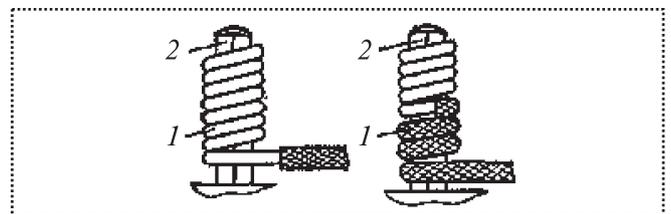


Рис. 1. Соединение проводов методом накрутки: а – немодифицированное; б – модифицированное; 1 – проводник; 2 – монтажный штырь-вывод

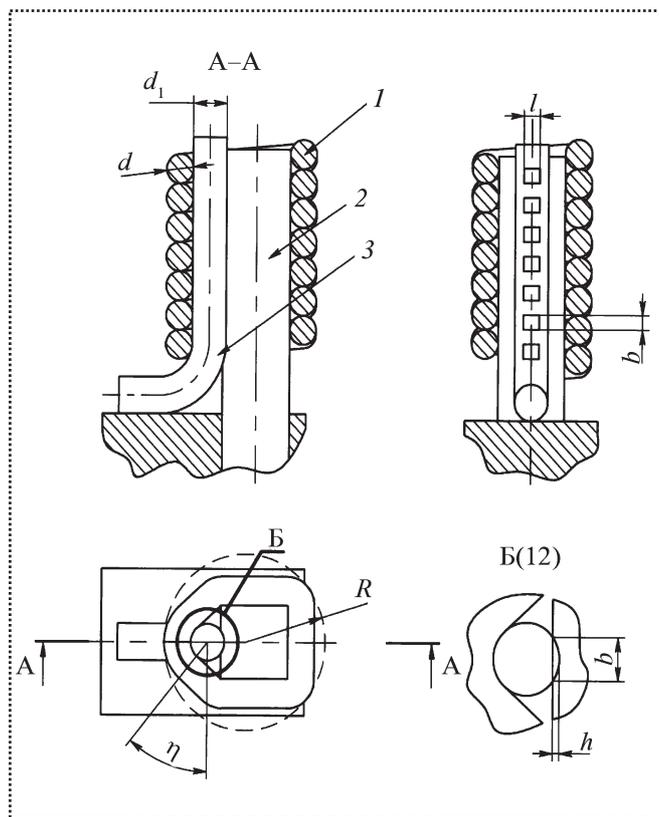


Рис. 2. Бандажное соединение накруткой:

1 – накручиваемый провод; 2 – монтажный штырь-вывод, 3 – вывод навесного элемента; a – длина большей стороны монтажного штыря-вывода; d – диаметр накручиваемого провода; d_1 – диаметр вывода навесного элемента; η – угол наклона накручиваемого провода; q – длина большей стороны монтажного штыря-вывода

да бандажироваемого элемента, поскольку это существенно влияет на напряжение натяжения в накручиваемом проводнике и определяет надежность выполнения технологического процесса.

Актуальной является постановка вопроса о величине усилия (напряжении) натяжения накручиваемого провода в процессе монтажа с бандажированием навесного элемента. Так как необходимое и достаточное усилие натяжения провода в этом случае из-за различных поверхностей контакта в зоне создания контактов бандажированием и накруткой должно быть различным (чего с учетом условий выполнения процесса невозможно достигнуть), то надо выяснить критические возможности выполнения процесса при одинаковом напряжении натяжения с обеспечением всех показателей качества.

Так как условия контакта при накрутке и бандажировании различные – при накрутке провод вре-

зается в штырь-вывод, а при бандажировании накручиваемый проводник деформируется на цилиндрической поверхности вывода навесного элемента – то вывод навесного элемента в местах его контакта со штырем-выводом также деформируется на плоской поверхности и на цилиндрической поверхности накручиваемого проводника. Различные условия контакта поверхностей обуславливают различные усилия контакта, поэтому здесь теоретически возможно возникновение критических соотношений между необходимыми усилиями накрутки и бандажирования, которые могут иметь место при значительно отличающихся диаметрах провода, вывода навесного элемента и вывода-штыря.

В этих условиях возможно существенное превышение усилия бандажирования по сравнению с усилием накрутки, которое может привести к разрыву накручиваемого провода у ребра штыря-вывода.

Для оценки возможности возникновения таких случаев сравним необходимые усилия накрутки и бандажирования, а также усилие бандажирования с допустимым его значением. С этой целью представим выражения, необходимые для определения напряжения накрутки и бандажирования и определим их возможные и допустимые соотношения.

Усилие натяжения провода P_n при накрутке можно определить на основе контактного напряжения σ_t , возникающего между накручиваемым проводом и штырем-выводом, с учетом трения на поверхности контакта f_n на двух ее частях на штыре-выводе [1]:

$$P_n = \sigma_t (1 + \mu) f_n, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения;

f_n – площадь поверхности контакта, определяемая при накрутке на основе упругого внедрения штыря-вывода до начала пластического деформирования в проводник на глубину $h = d \sigma_t / E$.

В результате получаем сегмент с основанием $q = h \sqrt{\frac{d}{h} - 1}$.

Так как в этом случае получаем два сегмента, наклоненных относительно биссектрисы угла 90° , то общая площадь их поверхности с учетом



площади сегмента $\left(f_{cr} = \frac{2}{3}qh\right)$ определится из формулы

$$f_n = 2 \frac{2}{\sqrt{2}} f_{cr} = 2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{\sqrt{2}} qh = \frac{8\sqrt{2}}{3} h^2 \sqrt{\frac{d}{h}-1}. \quad (2)$$

Необходимое напряжение натяжения при накрутке в проводнике получим при делении усилия натяжения P_n из формулы (1) наматываемого проводника на площадь его поперечного сечения:

$$\sigma_n = \frac{32\sqrt{2}}{3\pi} \sigma_T (1+\mu) \left(\frac{h}{d}\right)^2 \sqrt{\frac{d}{h}-1}. \quad (3)$$

Усилие натяжения проводника, необходимое при бандажировании, определяем подобно способу определения усилия при натяжении:

$$P_6 = \sigma_T (1+\mu) \frac{f_6}{\cos \eta}, \quad (4)$$

где f_6 – площадь поверхности контакта накручиваемого провода с выводом бандажируемого навесного элемента. Эту поверхность определим с учетом геометрических взаимосвязей, показанных на рис. 2:

$$f_6 = lb. \quad (5)$$

Здесь l – длина дуги контакта накручиваемого проводника с выводом навесного элемента $l = d_1 (\pi/2 - \eta)$; b – ширина контактной поверхности накручиваемого проводника с выводом навесного элемента $b = 2h \sqrt{\frac{d_1}{h}-1}$; d_1 – диаметр вывода навесного элемента; η – угол наклона накручиваемого провода в поперечном сечении штыря-вывода (в радианах).

Необходимое напряжение натяжения при бандажировании в соответствии с работой [3] определим, как и ранее – на основе площади $f_{к.б}$ поверхности контакта проводника накрутки с выводом навесного элемента как частное от деления усилия натяжения к площади поперечного сечения накручиваемого проводника:

$$f_{к.б} = lb = 2d_1 \left(\frac{\pi}{2} - \eta\right) h \sqrt{\frac{d_1}{h}}. \quad (6)$$

Угол η целесообразно выбирать в пределах от нуля до значения, ориентировочно равного одному радиану. Большие углы будут вызывать большие

напряжения и в этом случае может возникать опасность разрыва проводника. Следовательно, предпочтительным будет соотношение диаметра и вывода навесного элемента в пределах, близких 2...3. При этом будут возникать умеренные значения растягивающих напряжений и будет обеспечена надежность выполнения качественного соединения.

На основе приведенных соотношений возможно определение значений усилия и напряжения натяжения провода, обеспечивающих при минимальных усилиях наименьшее переходное электрическое сопротивление. Для этого подставим в выражение (4) соотношение (6):

$$P_{к.б} = \sigma_T (1+\mu) d_1 h \frac{\pi - \eta}{\cos \eta} \sqrt{\frac{d_1}{h}-1}. \quad (7)$$

После деления этого выражения на площадь поперечного сечения накручиваемого проводника определим необходимое для бандажирования значение напряжения

$$\sigma_{к.б} = \frac{4}{\pi} \sigma_T (1+\mu) \frac{d_1 h (\pi/2 - \eta)}{d^2 \cos \eta} \sqrt{\frac{d_1}{h}-1}. \quad (8)$$

Для оценки возможности возникновения или отсутствия разрыва накручиваемого при бандажировании провода целесообразно сравнить предельные напряжения, возникающие и необходимые для процесса накрутки и бандажирования навесного элемента. За предельное целесообразно принять минимальное напряжение растяжения, при котором будет минимальное переходное электрическое сопротивление.

Так как в практике электромонтажных работ процесс монтажа проходит с обязательным в начальный период упругим деформированием и началом пластического деформирования накручиваемого проводника, при котором переходное сопротивление не превосходит допустимого значения, то для случая бандажирования за предельное значение контактного напряжения принимают напряжение, равное пределу текучести. Это будет свидетельствовать о том, что при делении напряжения натяжения при бандажировании накруткой из формулы (9) на предел текучести σ_T всегда будем получать значение, меньшее единицы

$$\sigma_{к.б} / \sigma_T \leq 1. \quad (9)$$



Ориентировочно определим соотношение K_1 напряжений натяжения при бандажировании $\sigma_{к.б}$ и напряжения при накрутке σ_n и после преобразования для общего случая получим

$$K_1 = \frac{\sigma_{к.б}}{\sigma_n} = \frac{3 \frac{d_1}{h} \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right)}{8 \sqrt{2} (1 + \mu) \cos \eta}.$$

Для оценки числового значения этого соотношения примем обычно используемые при бандажировании материалы: материал штырей-выводов – бронза БрКМЦ3-1 или БрОФ6,5-0,15, материал накручиваемого проводника и вывода навесного элемента – медь М1 или М2, соотношение большей стороны штыря-вывода и диаметра проводника $a/d = 2$. При этих данных найдем значение этого соотношения, оно немногим превышает четыре. Этот результат не противоречит заданным условиям и подтверждает предположение о том, что при бандажировании поверхность контакта в несколько раз превышает поверхность контакта при накрутке.

Остается нерешенным вопрос: не превышает ли напряжение бандажирования значения, недопустимого с точки зрения предельного переходного сопротивления? Для этого разделим напряжение натяжения при бандажировании накруткой, определяемое формулой (9), на предельное его значение. Получим

$$K = (1 + \mu) \left(\frac{\pi}{2} - \eta \right) \frac{4d_1 h}{\pi d^2 \cos \eta} \sqrt{\frac{d_1}{h} - 1}.$$

При подстановке в это выражение тех же исходных данных устанавливаем, что это соотношение значительно меньше единицы, т.е. существенно меньше, чем σ_r . Поэтому можно утверждать, что при бандажировании накруткой во всех случаях **никогда** не будут возникать предельные растягивающие напряжения, а качество контакта для элементов при накрутке и бандажировании будет всегда обеспечено.

Заключение

В данной работе поставлен вопрос о возможности одновременного выполнения при любых условиях процессов накрутки и бандажирования накруткой. Постановка вопроса обусловлена требованиями обеспечения качества соединения – долговечности и надежности. Существенное значение здесь имеет площадь поверхности контакта каждого из трех элементов друг с другом: штыря-вывода, накручиваемого проводника и вывода навесного элемента. Площадь поверхности контакта согласно общим представлениям не должна быть меньше площади поперечного сечения каждого из контактирующих элементов.

Общая площадь поверхности контакта определяется геометрией контактирующих тел и значениями контактных напряжений, при создании которых не возникает недопустимое по величине переходное электрическое сопротивление. Созданная методика расчета для обеспечения контактных напряжений при накрутке и бандажировании накруткой позволяет уже на этапе расчета технологического приспособления предупредить этот экстремальный случай. Здесь также обоснована необходимость сохранения соотношения наибольшей стороны вывода к диаметру вывода навесного элемента в пределах, обеспечивающих надежное выполнение процесса монтажа, без разрыва накручиваемого проводника. Для этого при проектировании технологического приспособления рассчитывают параметры накручиваемого валика, этим автоматически исключают возможность возникновения предельных напряжений.

Библиографический список

1. Ковалев В.Г., Ковалев С.В., Коновалов В.А. Основные расчетные параметры электро монтажа методом накрутки // Технологии в электронной промышленности. 2008. № 8. С. 14–18.
2. Фейгин И.М. Краткий технический справочник. Ростов: Книжное Изд-во, 1951. 91 с.
3. Ковалев В.Г. Бандажирование накруткой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 8. С. 32–35.

ПИТАНИЕ СБОРОЧНЫХ ЛИНИЙ. КОМПЛЕКТАЦИЯ. СКЛАДИРОВАНИЕ. УПАКОВКА

УДК 658.527.011

А.А. Иванов, д-р техн. наук

(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)

E-mail: ivanov_aa@nntu.nnov

Логистическая задача распределения грузов с помощью транспортных роботов

Представлена логистическая модель задачи оптимизации с помощью табличной формы линейного программирования, для которой применяют специальный метод потенциалов, являющийся разновидностью симплекс-метода. Метод потенциалов в ряде случаев позволяет упростить решение задачи поэтапного достижения экстремума целевой функции. Этот метод широко применяют при решении транспортной задачи, результатом которой является определение оптимальной схемы перевозок грузов транспортными роботами от поставщиков к потребителям.

The logistical model of the optimization problem via a tabular form of the linear programming, for which the special method of potentials is used which is a kind of simplex-method, is submitted. In some cases the method of potentials allows to simplify the solving of the problem of phased achievement of the objective function extremum. This method is widely used in solving of transport problems. The result of it is determination the optimal transport scheme of cargo by transport robots from suppliers to consumers.

Ключевые слова: логистическая модель, метод потенциалов, транспортный робот.

Keywords: logistical model, method of potentials, transport robot.

К задачам логистики относят различные транспортные задачи, в результате решения которых определяют оптимальную схему перевозок грузов от поставщиков к потребителям. Для решения подобных задач широко используют математическую модель оптимизации в виде табличной формы линейного программирования и специальный метод потенциалов, который в ряде случаев позволяет упростить решение задачи поэтапного достижения экстремума целевой функции [1, 2].

Обычно задачу формулируют следующим образом. Пусть имеется m пунктов хранения однородного продукта (например, заготовок одного типа), в каждом из которых находится соответственно a_1, a_2, \dots, a_m количеств продукта. Имеется n пунктов потребления этого продукта, в каждый из которых требуется доставить b_1, b_2, \dots, b_n количеств продукта. Известны удельные затраты c_{ij} на перевозку единицы продукта из каждого i -го пункта хранения ($i = 1, m$) в каждый j -й пункт потребления ($j = 1, n$). Оптимальным является план перевозок, при котором суммарные транспортные затраты минимальны. Данные транспортной задачи представляют в виде табл. 1.

Таблица 1

Данные транспортной задачи для решения методом потенциалов

Пункты хранения	Пункты потребления					a_i
	B 1	B 2	B 3	·	B n	
A 1	c_{11} x_{11}	c_{12} x_{12}	c_{13} x_{13}	·	c_{1n} x_{1n}	a_1
A 2	c_{21} x_{21}	c_{22} x_{22}	c_{23} x_{23}	·	c_{2n} x_{2n}	a_2
· ·	· · ·	· · ·	· · ·	·	· · ·	·
A n	c_{m1} x_{m1}	c_{m2} x_{m2}	c_{m3} x_{m3}	·	c_{mn} x_{mn}	a_m
b_j	b_1	b_2	b_3	·	b_n	$\Sigma b_j = \Sigma a_i$



Таблица 2

**Исходные данные
к примеру транспортной задачи**

АС	ГПС			a_i
	У1	У2	У3	
Н1	20 x_{11}	20 x_{12}	30 x_{13}	1800
Н2	30 x_{21}	40 x_{22}	20 x_{23}	2600
b_j	1000	1200	2200	4400

Сумма произведений $c_{ij} x_{ij}$ каждой клетки дает выражение целевой функции

$$L = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min ,$$

где x_{ij} – количество продукта, доставляемого из i -го пункта хранения в j -й пункт потребления.

Система ограничений имеет вид равенств

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = b_j ; \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = a_i ,$$

где $x_{ij} > 0$.

Уравнение баланса (правая нижняя клетка таблицы) имеет вид:

$$\sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^m a_i .$$

Рассмотрим пример решения задачи методом потенциалов. Исходные данные к примеру даны в табл. 2.

Пусть из двух накопителей Н1 и Н2 автоматического склада АС необходимо доставить заготовки одного типа с помощью транспортных роботов на три производственных участка гибкой производственной системы ГПС: У1, У2, У3.

Баланс будет равен:

$$\sum_{j=1}^n b_j = \sum_{i=1}^m a_i = 4400 .$$

Требуется определить оптимальное число единиц груза x_{ij} .

Этап № 1.

Для определения первоначального допустимого базисного плана сначала заполняем верхнюю левую клетку, по возможности удовлетворяя полностью запрос потребителя У1, т.е. назначаем $x_{11}=1000$. При этом учитывается, чтобы затраты c_{11} были минимальными. В нашем примере $c_{11}=c_{12}=20$, поэтому можно заполнять как клетку (11), так и клетку (12). После заполнения клетки (11) остаток заготовок из Н1 запишем в клетку (12), т.е. $x_{12}=1800-1000=800$ заготовок пойдет на участок У2. Для потребителя У3 останется $x_{13}=0$.

Во второй строке клетка с минимальными затратами $c_{23}=20$ соответствует участку У3, поэтому туда записываем всю потребность $x_{23}=2200$. Остаток из Н2 запишем в соседнюю клетку (22), т.е. $x_{22}=2600-2200=400$. Для потребителя У1 останется $x_{21}=0$.

Заполненные клетки соответствуют *базисным* переменным, а незаполненные – *свободным*. После заполнения клеток получим табл. 3. Проверим начальный опорный план на оптимальность. Для свободных клеток ($x_{ij}=0$) оптимального плана должно выполняться условие

$$v_j - u_i \leq c_{ij} ,$$

где v_j – потенциал j -го столбца ($j = 1, 2, 3$ – номер столбца);

u_i – потенциал i -й строки ($i = 1, 2$ – номер строки).

Значения потенциалов находим из условия: $v_j - u_i = c_{ij}$ для базисных клеток ($x_{ij}=0$). Напишем эти равенства:

Таблица 3

Распределение грузов на первом этапе

АС	ГПС			a_i
	У1	У2	У3	
Н1	20 1000	20 800	30 0	1800
Н2	30 0	40 400	20 2200	2600
b_j	1000	1200	2200	4400



- клетка 11: $v_1 - u_1 = 20$;
- клетка 12: $v_2 - u_1 = 20$;
- клетка 22: $v_2 - u_2 = 40$;
- клетка 23: $v_3 - u_2 = 20$.

Так как переменных здесь больше, чем уравнений, то принимаем, например, $u_1 = 0$. Тогда получим: $u_2 = -20$; $v_1 = 20$; $v_2 = 20$; $v_3 = 0$.

Теперь проверим неравенства для свободных клеток:

- клетка 13: $v_3 - u_1 \leq 30$, $0 - 0 \leq 30$ (условие выполняется);
- клетка 21: $v_1 - u_2 \leq 30$, $20 + 20 \leq 30$ (условие не выполняется).

Следовательно, начальный план не оптимален. Необходимо его улучшить.

Этап № 2.

В клетку (21), для которой не выполняется контрольное неравенство, перенесем поставку груза из соседней клетки (22) и получим: $x_{21} = 400$, $x_{22} = 0$. Затем, двигаясь по ходу часовой стрелки, с целью сохранения баланса цифру 400 вычтем из клетки (11) и добавим 400 в клетку (12). В результате цикла пересчета новые значения базисных переменных будут: $x_{11} = 1000 - 400 = 600$; $x_{12} = 800 + 400 = 1200$. Значения переменных в столбце У3 остались преж-

Таблица 4

Распределение грузов на втором этапе

АС	ГПС			a_i
	У1	У2	У3	
Н1	20	20	30	1800
	600	1200	0	
Н2	30	40	20	2600
	400	0	2200	
b_j	1000	1200	2200	4400

ними. После заполнения на втором этапе получаем табл. 4.

Если при пересчете сразу в нескольких вершинах цикла будут нулевые поставки, то свободной объявляется одна клетка, а остальные остаются базисными с нулевыми поставками.

Проверим новый допустимый план на оптимальность.

Сначала найдем значения потенциалов, полагая $u_1 = 0$; $u_2 = -10$; $v_1 = 20$; $v_2 = 20$; $v_3 = 10$. Затем проверим неравенства:

- клетка 13: $v_3 - u_1 \leq 30$, $10 - 0 \leq 30$ (условие выполняется);
- клетка 22: $v_2 - u_2 \leq 40$, $20 + 10 \leq 40$ (условие выполняется).

Следовательно, данное решение *оптимально*.

Сравним значения целевой функции для исходного и оптимального планов:

$$L_1 = 20 \cdot 1000 + 20 \cdot 800 + 40 \cdot 400 + 20 \cdot 2200 = 96\,000 \text{ ед.}$$

$$L_2 = L_{\text{опт}} = 20 \cdot 600 + 20 \cdot 1200 + 30 \cdot 400 + 20 \cdot 2200 = 92\,000 \text{ ед.}$$

В результате оптимизации достигается экономия 4000 единиц без дополнительных капитальных вложений.

Вывод

На примере гибкой производственной системы, состоящей из трех автоматизированных участков, накопителей автоматического склада и транспортных роботов, показано решение задачи по оптимизации схемы перевозок грузов от поставщиков к потребителям с использованием метода потенциалов, который позволяет упростить процедуру поэтапного достижения экстремума целевой функции.

Библиографический список

1. Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. М.: "Форум", 2011. 224 с.
2. Иванов А.А. Теоретические основы процессов манипулирования объектами обработки и сборки. Нижний Новгород: НГТУ, 2009. 257 с.

УДК 629.7.002.72:004.896:519.846.5

Ю.Н. Золотарев, д-р техн. наук
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: yu_zol@mail.ru

Прогнозирование качества собираемой авиационной конструкции

Рассмотрена модель манипулирования структурой выборочных данных, описывающих состояние авиационного изделия в процессе его сборки. Результаты моделирования предложено использовать для оперативного управления сборочным процессом. Регрессионная модель прогноза качества построена на основе выборочных данных, полученных на реальном производстве.

The manipulation of the structure model sample data describing the condition of aviation products during its assembly was considered. The simulation results is proposed to use for operational management assembly process. The regression model for prediction of quality is based on sample data obtained in actual production.

Ключевые слова: моделирование, качество, управление, сборочный процесс.

Keywords: modeling, quality, control, assembly process.

Введение

Совершенствование управления сборочными процессами в авиастроении требует разработки эффективных моделей формирования качества изделия. Они должны учитывать специфику оперативной информации о состоянии собираемой авиационной конструкции (АК) на различных этапах производства.

Технологическая последовательность сборки любой части АК (панелей, отсеков, узлов, агрегатов) состоит из трех основных этапов.

Этап 1 – установка (базирование) собираемых элементов (далее – деталей) в сборочном приспособлении (СП), прижатие их к базовым опорам базово-фиксирующих устройств (БФУ) СП и фиксация. Размещение БФУ вдоль базируемых контуров деталей носит дискретный характер.

Этап 2 – выполнение сборочных соединений (заклепочных, болтовых, сварочных и т.п.).

Этап 3 – расфиксация и извлечение собранного изделия из СП.

Каждый из выделенных этапов обладает следующими характерными особенностями:

- этап 1 характеризуется образованием зазоров между деталями и БФУ. Величина зазоров зависит от погрешности изготовления деталей и погрешности изготовления БФУ СП. Прижатия, необходимые для совмещения сборочных баз деталей и БФУ, обеспечивают уменьшение (ликвидацию) зазоров. Значения усилий прижатия зависят от механических характеристик деталей, шага размещения БФУ и механизма передачи нагрузки. В деталях возникают внутренние напряжения, вызванные упругими деформациями от изгибающих сил прижатия;
- этап 2 связан с увеличением внутренних напряжений в собираемых деталях, что обусловлено технологией соединения;
- на этапе 3 под действием внутренних напряжений происходит деформация готового изделия, которая определяет его окончательную форму и размеры.

Очевидно, что для принятия своевременных решений по управлению сборочным процессом необходим прогноз показателей качества собранной на этапе 3 АК по параметрам ее состояния на этапе 1.

Учитывая сложившуюся практику контроля качества сборки АК, перейдем к формализации структуры исходных данных и задачи синтеза модели прогноза качества АК.

Модель данных

Собираемая АК принадлежит множеству однотипных изделий. Параметры ее состояния группи-



руют по атрибутивным признакам, образующим следующие множества идентификаторов:

$$\begin{aligned} A &= \{k | k - \text{изделие}\}; B = \{m | m - \text{стрингер}\}; \\ C &= \{j | j - \text{шпангоут или нервюра}\}; \\ D &= \{l | l - \text{точка контроля}\}; \\ E &= \{n | n - \text{зона контроля}\}. \end{aligned} \quad (1)$$

Далее для удобства (в отличие от терминологии сферы производства) при идентификации элементов множеств (1) будем использовать следующие индексы:

$$\begin{aligned} k &= \overline{1, K}; j = \overline{1, J}; m = \overline{1, M}; l = \overline{1, L}; \\ n &= \overline{1, N}, \end{aligned} \quad (2)$$

которые нумеруют уровни факторов A, B, C, D и E соответственно, причем $K \ll M$ и $K \ll J$.

Состояние k -й АК изменяется от этапа 1 к этапу 3 согласно технологии. На этапе 1 его характеризует k -я матрица зазоров, измеренных между базовыми поверхностями БФУ и обшивкой собираемой АК:

$$X_k = \|x_{kmj}\|, \quad (3)$$

где x_{kmj} — значение зазора, измеренного на изделии с k -м индексом в точке пересечения m -го стрингера с j -м элементом поперечного подкрепляющего набора обшивки АК, мм.

На множестве индексов элементов поперечного подкрепляющего набора C задано отношение

$$R \subset \{(1, 2), (1, 3), \dots, (J-1, J)\} \subset C \times C, \quad (4)$$

где

$$R = \{(r_n, \rho_n) | r_n, \rho_n \in C; n = \overline{1, N}\}. \quad (5)$$

Здесь r_n, ρ_n — индексы двух шпангоутов (или нервюр), ограничивающих n -ю зону контроля; символ "×" означает "декартово произведение".

Отношение (4) объединяет некоторые упорядоченные пары из числа пар, отвечающих понятию "1-й элемент пары строго меньше 2-го". Его мощность $|R| = N$, а номера упорядоченных пар образуют множество E в выражении (1).

С учетом выражения (5) матрица (3) делится на N подматриц:

$$\|x_{kmj} r_n \leq j < \rho_n\|, \quad n = \overline{1, N}. \quad (6)$$

Отношение (4) определяет N зон контроля, в том числе волнистости, характеризующей состояние АК на этапе 3.

Волнистость на k -й АК оценивается двумя матрицами

$$H_k = \|h_{kln}\| \quad \text{и} \quad S_k = \|s_{kln}\|, \quad (7)$$

где h_{kln} — отклонение от теоретической поверхности, измеренное по нормали к ней (далее для краткости — прогиб) на k -й АК в точке l зоны n , мм;

s_{kln} — площадь, на которой наблюдается прогиб h_{kln} , мм².

Требуется по данным для K изделий множеств (3) и (7) построить отображение

$$f: \overline{\Delta X} \rightarrow \overline{h}, \quad (8)$$

где $\overline{\Delta X}$ и \overline{h} — показатели, обобщающие K множеств (3) и $2K$ множеств (7) соответственно.

Модель (8) предназначена для прогноза волнистости на $(K+1)$ -м изделии по результатам этапа 1 его сборки, оформленным согласно (3) матрицей X_{K+1} .

Анализ и синтез

Альтернативные варианты структуры модели (8) можно строить на основе различных трансформаций (3) и (7), получаемых усреднениями выборочных данных по тем или иным уровням (2).

Вполне естественно, что процедуры усреднения полезно сопровождать анализами значимости влияния тех или иных факторов (1) на элементы модели данных. Результаты этих анализов, во-первых, идентифицируют условия синтеза модели прогноза (8), как условия ее адекватности, а во-вторых, обеспечивают оценку точности и стабильности текущего этапа сборочного процесса.

Для идентификации начальных условий синтеза (8) воспользуемся дисперсионным анализом матрицы наблюдений

$$Y_0 = \|X_k | k = \overline{1, K}\|, \quad (9)$$

состоящей из K подматриц (3), когда одновременно действуют факторы A и C при M повторениях.

Здесь и далее, обращаясь к дисперсионному анализу, считаем, что его предпосылки выполнены и реализована типовая процедура сравнения рас-



четных F -статистик с их критическими значениями.

Применительно к факторам A и C для выражения (9) имеем следующий результат сравнения:

$$\begin{aligned} F_A(Y_0)q_1 F_A^*[\alpha, K-1, KJ(M-1)]; \\ F_C(Y_0)q_2 F_C^*[\alpha, J-1, KJ(V-1)]; \\ F_{AC}(Y_0)q_3 F_{AC}^*[\alpha, (K-1)(J-1), KJ(M-1)], \end{aligned} \quad (10)$$

где

$$(q_1, q_2, q_3) = Q_0, \quad Q_0 \subset \Gamma^3, \quad \Gamma = \{<, >\}; \quad (11)$$

α – уровень значимости;

нижние индексы в формуле (10) идентифицируют фактор или взаимодействие факторов;

верхний индекс "*" означает "критическое значение";

Γ – множество символов, обозначающих понятия "строго меньше" и "строго больше".

Упорядоченная тройка в выражении (11) компактно представляет начальные условия синтеза (8). Например, если по формуле (10) $Q_0 = (>, >, <)$, то влияние факторов A, C в отличие от их взаимодействия на зазор между БФУ и обшивкой значимо.

Введем обобщенный показатель качества АК как результат этапа 3, усреднив элементы матрицы прогибов (5) следующим образом:

$$h_{k^*n} = \sum_{l=1}^L h_{kln} s_{kln} / \sum_{l=1}^L s_{kln} \quad (k = \overline{1, K}; n = \overline{1, N}), \quad (12)$$

где символ "*" – замена индекса уровня фактора, по которому происходит усреднение (здесь замена l фактора D);

h_{k^*n} – средняя волнистость на k -й АК в n -й зоне контроля.

Предположим, что множество (12) обусловлено вариацией зазоров (6). Тогда из выражения (6) для n -й зоны контроля на k -м изделии определим размах по m -му стрингеру

$$\begin{aligned} \Delta x_{kmn} = \sup \{x_{kmj} | r_n \leq j < \rho_n\} - \\ - \inf \{x_{kmj} | r_n \leq j < \rho_n\}. \end{aligned} \quad (13)$$

Для обобщенной оценки вариации зазоров введем средний размах по M стрингерам

$$\Delta x_{k^*n} = \frac{1}{M} \sum_{m=1}^M \Delta x_{kmn} \quad (k = \overline{1, K}; n = \overline{1, N}). \quad (14)$$

Далее множество (14) рассматриваем как область определения отображения (8), а выражение (12) – как множество значений, т.е. f по формуле (8) отображает

$$\Delta x_{k^*n} \in \overline{\Delta X} \quad \text{в} \quad h_{k^*n} \in h. \quad (15)$$

Сформировав множество пар

$$\{(\Delta x_{k^*n}, h_{k^*n}) | k = \overline{1, K}; n = \overline{1, N}\}, \quad (16)$$

можно воспользоваться стандартной процедурой регрессионного анализа, допустив, что она применима для построения регрессии \bar{h} по $\overline{\Delta X}$. Процедура позволит оценить адекватность полученной регрессионной модели и возможность ее применения для прогноза.

Синтезу регрессионной модели будет сопутствовать ситуация, идентифицируемая дисперсионными анализами матриц

$$Y_1 = \overline{\Delta X}, \quad Y_2 = h \quad (17)$$

без повторений, когда одновременно действуют факторы A и E . По аналогии с выражениями (10) и (11) имеем следующие результаты сравнения:

$$\begin{aligned} F_A(Y_i)q_{2+2i} F_A^*[\alpha, K-1, (K-1)(N-1)]; \\ F_E(Y_i)q_{3+2i} F_E^*[\alpha, N-1, (K-1)(N-1)], \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$(q_{2+2i}, q_{3+2i}) = Q_i, \quad Q_i \subset \Gamma^2; \quad i = 1, 2. \quad (19)$$

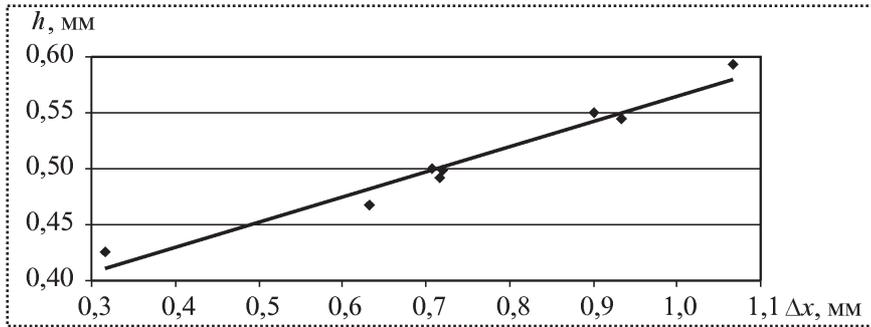
Результаты сравнений выражения (10), (18) в форме (11), (19) соответственно позволяют аналогично [1] оценить стабильность сборочного процесса и отнести его состояние на этапе 1 к одному из следующих трех типичных состояний:

- *состояние А*: процесс стабилен и по разбросу и по положению среднего арифметического, если

$$Q_0 = (<, <, <) \quad \text{и} \quad Q_1 = (<, <); \quad (20)$$

- *состояние Б*: процесс стабилен только по разбросу, если

$$Q_0 \neq (<, <, <) \quad \text{и} \quad Q_1 = (<, <); \quad (21)$$



Корреляционное поле и линия регрессии

• *состояние В*: стабильность процесса не подтверждена, если

$$Q_0 \neq (<, <, <) \text{ и } Q_1 \neq (<, <). \quad (22)$$

Линейная модель парной регрессии

Рассмотрим пример синтеза регрессионной модели на основе выборочных данных, полученных на реальном производстве отсека фюзеляжа.

Модель данных имела следующие размерности:

$$K = 4; M = 6; J = 7; L = 3; N = 2. \quad (23)$$

Синтез регрессии осуществлен в ситуации, идентифицируемой следующими упорядоченными наборами:

$$Q_0 = (>, >, <); Q_1 = Q_2 = (<, <), \quad (24)$$

что соответствует выражению (21), когда сборочный процесс находится в состоянии Б.

Электронный процессор Excel обеспечил регрессионный анализ пар (16). На рисунке представлено соответствующее поле корреляции и отображен график полученной далее регрессии.

В итоге получена следующая модель:

$$h = 0,340 + 0,225 \Delta x. \quad (25)$$

Анализ качества (25) для $\alpha = 0,05$ показал следующее.

Величина $R^2 = 0,957$, следовательно, 95,7 % дисперсии значений средней волнистости обшивки фюзеляжа объясняется влиянием (14).

Расчетное значение критерия Фишера $F = 134,70$, что существенно больше его критического значения $F^*(\alpha, 1, 6) = 5,99$. Следовательно, уравнение регрессии в целом статистически значи-

мо, так как имеется хорошее соответствие экспериментальным данным.

Для всех параметров модели (25) расчетное значение t -статистики больше критического значения $t^*(\alpha, 6) = 2,45$, что подтверждает их статистическую значимость. Об этом же свидетельствуют границы доверительного интервала (нижние 95 и верхние 95 %) этих параметров и P -значения, не превышающие 0,05. Следовательно, нулевая гипотеза о том, что параметры модели регрессии могут принимать нулевые значения, отвергается.

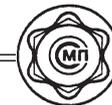
Так как уравнение и параметры модели регрессии статистически значимы, то выражение (25) можно использовать для прогнозирования.

Вывод

Рассмотренный подход расширяет математическое обеспечение интерактивных процедур оперативного управления сборочным процессом АК [2]. Предлагаемый алгоритм синтеза создает условия для прогноза качества собираемого объекта на основе постоянно расширяемой базы данных. Потребность в таких процедурах, составляющих основу совершенствуемой базы знаний о технологии сборки, очевидна в условиях динамично изменяющегося производства авиационной техники.

Библиографический список

- ГОСТ Р 50779.44-2001. Статистические методы. Показатели возможностей процессов. Основные методы расчета.
- Золотарёв Ю.Н. Статистическое регулирование технологических процессов для системы менеджмента качества сборки летательного аппарата / Мат. XIII Всеросс. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов "Авиакосмические технологии (АКТ-2012)". Воронеж: "Элист", 2012. С. 57–66.



УДК 681.2:537.7

С.Г. Тымчик (Национальный технический университет Украины
"Киевский политехнический институт")
E-mail: deanpb@kpi.ua

Погрешности сборки когерентных оптических спектроанализаторов

Рассмотрена взаимосвязь между погрешностями, возникающими при юстировке деталей оптической системы когерентного спектроанализатора, и погрешностями дифракционного изображения в плоскости спектрального анализа. Обоснованы требования и рекомендации по сборке оптической системы.

The interconnection between adjustment errors of a coherent optical spectrum analyzer system components and a diffraction image aberration in spectral analysis plane has been studied. Optical system assembly requirements and recommendations have been grounded.

Ключевые слова: погрешность, спектроанализатор, дифракция, фаза, частота.

Keywords: fault, spectrum analyzer, diffraction, phase, frequency.

Введение

Для решения различных метрологических задач применяют когерентные оптические спектроанализаторы (КОС) [1, 2]. Одним из основных требований к оптической системе таких анализаторов является точность юстировки деталей. Это обусловлено зависимостью погрешностей пространственных и энергетических параметров дифракционного изображения объекта от ошибок сборки и юстировки оптической системы. До настоящего времени вопросам точности КОС не уделялось достаточного внимания.

В данной статье исследуется взаимосвязь между погрешностями, возникающими при юстировке деталей оптической системы КОС, и погрешностями дифракционного изображения.

Постановка задачи

В качестве объекта исследований выбрана оптическая система анализатора, в которой входной транспарант расположен перед Фурье-объективом. Анализ распространения когерентной световой волны в таком КОС приведен в работе [3]. На осно-

вании этого анализа можно выделить погрешности, возникающие при продольной дефокусировке, поперечном децентрировании и перекосах деталей (см. рисунок) и приводящие к погрешностям амплитуды, фазы и пространственной частоты светового поля дифракционного изображения.

Обоснование видов погрешностей сборки

Погрешности юстировки деталей оптической системы КОС являются первичными по отношению к погрешностям дифракционного изображения. Они обычно намного меньше по сравнению с соответствующими базовыми размерами, что позволяет применить для исследований методы линейной теории точности.

В качестве эталонного объекта выбрана прямоугольная щель, которая по сравнению с другими объектами наиболее легко и точно воспроизводится, а ее функция пропускания $t(x_1, y_1)$ описывается выражением

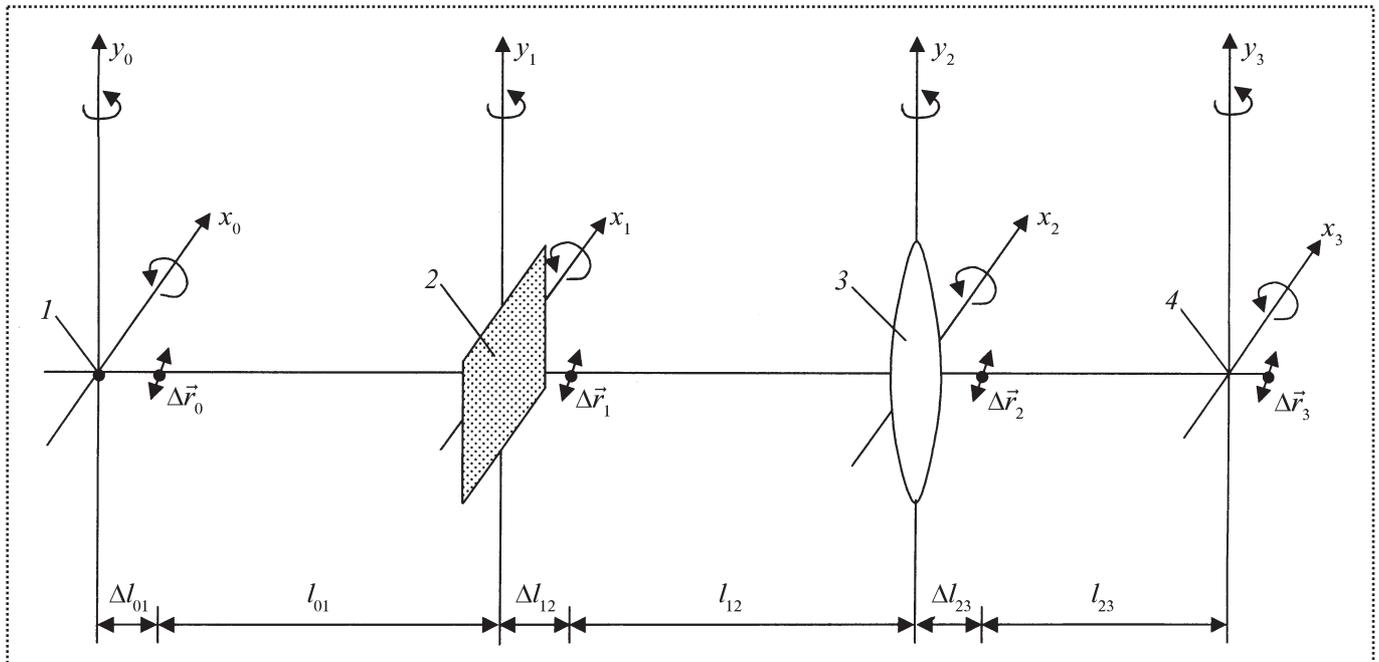
$$t(x_1, y_1) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x_1| \leq b/2, |y_1| \leq a/2; \\ 0 & \text{в других случаях,} \end{cases} \quad (1)$$

где b, a – ширина и высота щели.

При регистрации дифракционного изображения квадратичными фотодетекторами анализируются его энергетические и пространственные параметры, поэтому будем рассматривать погрешности именно этих параметров, т.е. амплитудную и частотную погрешности.

В работе [3] получено выражение, описывающее распределение светового поля в произвольной плоскости за Фурье-объективом, которое в одномерном случае (для гомоцентрической оптической системы) можно записать в виде

$$U(x_3) = C_0 e^{j\frac{kx^2}{2l_{23}}} \int_{-\infty}^{\infty} \int t(x_1) e^{j\frac{k}{2}\left(\frac{1}{l_{01}} + \frac{1}{l_{12}}\right)x_1^2} \times \\ \times e^{-j\frac{k}{2}\left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f}\right)x_2^2} e^{-j\frac{k}{l_{12}}x_1x_2} e^{-j\frac{k}{l_{23}}x_2x_3} dx_1 dx_2, \quad (2)$$


Погрешности юстировки деталей оптической системы КОС:

$\Delta l_{i,i+1}$ – продольная дефокусировка базового расстояния $l_{i,i+1}$; $\overline{\Delta r}_i = \overline{\Delta x}_i + \overline{\Delta y}_i$ – вектор поперечных децентрирований i -й детали; γ_i – угловые перекосы i -й детали вокруг осей x_i и y_i ; 1 – источник излучения (лазер); 2 – входной транспарант (исследуемый объект); 3 – Фурье-объектив; 4 – плоскость спектрального анализа

где $C_0 = \frac{A_0}{j\lambda^3 l_0 l_{12} l_{23}}$ (A_0 – амплитуда световой вол-

ны, λ – длина волны излучения лазера);

j – мнимая единица в ядре преобразования;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число;

f – фокусное расстояние объектива.

При выполнении условия фокусировки

$$l_{23} = f \frac{l_{01} + l_{12}}{l_{01} + l_{12} - f} \quad (3)$$

распределение интенсивности светового поля дифракционного изображения эталонного объекта (1) получим, возведя в квадрат результат интегрирования (2):

$$I(x_3) = \frac{A_0^2 b^2}{\lambda^4 l_{01}^2 l_{12}^2 l_{23}^2 \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)^2} \times \text{sinc}^2 \left[\frac{bx_3}{\lambda l_{12} l_{23} \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)} \right] \quad (4)$$

В выражении (4) перейдем от пространственной координаты x_3 к пространственной частоте f_x :

$$f_x = \frac{x_3}{\lambda l_{12} l_{23} \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)} \quad (5)$$

Тогда

$$I(f_x) = \frac{A_0^2 b^2}{\lambda^4 l_{01}^2 l_{12}^2 l_{23}^2 \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)^2} \text{sinc}^2 [bf_x] \quad (6)$$

Определение погрешностей интенсивности и пространственной частоты

Интенсивность и положение m -го максимума дифракционного изображения щели (6) определяется экстремумами функции $\text{sinc}^2 [bf_x]$. Поэтому формулу (6) можно записать в виде

$$I_m = \frac{A_0^2 b^2}{\lambda^4 l_{01}^2 l_{12}^2 l_{23}^2 \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)^2} M_m, \quad (7)$$



где $M_m \approx \frac{4}{\pi^2 (2m+1)^2}$.

Таким образом, интенсивность m -го максимума зависит от его порядкового номера m и геометрических параметров оптической системы.

Погрешности интенсивности и пространственной частоты будем искать в виде суммы полных конечных приращений:

$$\Delta I_m = \frac{\partial I_m}{\partial l_{01}} \Delta l_{01} + \frac{\partial I_m}{\partial l_{12}} \Delta l_{12} + \frac{\partial I_m}{\partial l_{23}} \Delta l_{23}; \quad (8)$$

$$\Delta f_x = \frac{\partial f_x}{\partial l_{01}} \Delta l_{01} + \frac{\partial f_x}{\partial l_{12}} \Delta l_{12} + \frac{\partial f_x}{\partial l_{23}} \Delta l_{23}. \quad (9)$$

Подставив в формулы (8) и (9) выражения (7) и (8) соответственно и продифференцировав их с учетом условия фокусировки (3), получим:

$$\Delta I_m = -\frac{2I_m}{l_{01}} \Delta l_{01} + \frac{2I_m}{l_{01}} \Delta l_{12} - \frac{2I_m}{l_{01} f^2} (f - l_{12})(l_{01} + l_{12} - f) \Delta l_{23};$$

$$\Delta f_x = \frac{f_x}{l_{01}} \Delta l_{12} - \frac{f_x}{l_{01} f^2} (f - l_{12})(l_{01} + l_{12} - f) \Delta l_{23}.$$

Введем относительные погрешности интенсивности и пространственной частоты:

$$\delta I_m = \frac{\Delta I_m}{I_m} \quad \text{и} \quad \delta f_x = \frac{\Delta f_x}{f_x}.$$

Тогда

$$\delta I_m = k_{01}^a \Delta l_{01} + k_{12}^a \Delta l_{12} + k_{23}^a \Delta l_{23}, \quad (10)$$

$$\text{где} \quad k_{01}^a = -\frac{2}{l_{01}}, \quad k_{12}^a = \frac{2}{l_{01}},$$

$$k_{23}^a = -\frac{2}{l_{01} f^2} (f - l_{12})(l_{01} + l_{12} - f) \quad \text{— относительные}$$

функции влияния соответствующих погрешностей юстировки при определении амплитудной погрешности.

При этом

$$\delta f_x = k_{12}^f \Delta l_{12} + k_{23}^f \Delta l_{23},$$

$$\text{где} \quad k_{12}^f = \frac{1}{l_{01}}, \quad k_{23}^f = \frac{(f - l_{12})(l_{01} + l_{12} - f)}{l_{01} f^2} \quad \text{— относи-}$$

тельные функции влияния соответствующих погрешностей юстировки при определении частотной погрешности.

Как видно из формулы (10), функции k_{01}^a и k_{12}^a не зависят от f и l_{12} и обусловлены лишь радиусом кривизны l_{01} фронта освещающей волны. Объясняется это тем, что при изменении радиуса l_{01} на малую величину Δl_{01} изменяется световой поток, падающий на входной транспарант, а следовательно, и его освещенность, поскольку она пропорциональна величине светового потока в телесном угле, основанием которого является входной транспарант, а вершиной — точечный источник излучения. Для уменьшения влияния погрешностей Δl_{01} и Δl_{12} на амплитудную погрешность δI_m необходимо увеличивать l_{01} .

Функция k_{23}^a определяется параметрами l_{01} , l_{12} и f , выбором соотношения которых можно уменьшить влияние погрешности Δl_{23} на амплитудную погрешность δI_m . В частном случае

$$k_{23}^a = 0 \quad \text{при} \quad f - l_{12} = 0 \quad \text{или} \quad \text{при} \quad l_{01} + l_{12} - f = 0. \quad (11)$$

Первое условие (11) соответствует расположению входного транспаранта в передней фокальной плоскости Фурье-объектива. Объяснить это можно тем, что при такой установке входного транспаранта сферические волны преобразуются Фурье-объективом в плоские. Поэтому малые смещения Δl_{23} не оказывают влияния на плотность энергии в плоскости фокусировки дифракционного изображения. Второе условие (11) соответствует расположению точечного источника излучения в передней фокальной плоскости Фурье-объектива; при этом $l_{23} \rightarrow \infty$ согласно выражению (3), что не представляет практического интереса.

Функции влияния погрешностей

Погрешность	Первичные погрешности юстировки									
	Δl_{01}	Δl_{12}	Δl_{23}	Δx_0	Δx_1	Δx_2	Δx_3	γ_0	γ_1	γ_2
Амплитуда ΔI_m	$-\frac{2}{l_{01}} I_m$	$\frac{2}{l_{01}} I_m$	$-\frac{2(f - l_{12})(l_{01} + l_{12} - f)}{l_{01} f^2}$	0	0	0	0	0	0	0
Частоты Δf_x	0	$\frac{f_x}{l_{01}}$	$\frac{(f - l_{12})(l_{01} + l_{12} - f)}{l_{01} f^2} f_x$	$-\frac{1}{\lambda l_{01}}$	0	$\frac{l_{01} + l_{12}}{\lambda f l_{01}}$	$\frac{l_{01} + l_{12} - f}{\lambda f l_{01}}$	0	0	$\frac{l_{01} + l_{12}}{\lambda f l_{01}}$



Анализ взаимосвязей погрешностей

Таким образом, при $l_{01} \rightarrow \infty$ и $l_{12} = f$ функции влияния первичных погрешностей Δl_{01} и Δl_{12} на погрешность δI_m интенсивности, а также соответствующие функции влияния на частотную погрешность обращаются в нуль. Поэтому такое соотношение геометрических параметров системы КОС является оптимальным.

Рассмотрим влияние поперечных смещений (децентрирования) Δx_1 деталей на распределение пространственно-энергетических параметров дифракционного изображения. Поскольку интенсивность m -го максимума дифракционного изображения щели согласно выражениям (4) и (6) не зависит от параметров x_i , соответствующие малые смещения Δx_i не оказывают влияния на распределение интенсивности светового потока в плоскости $x_3 y_3$ спектрального анализа.

Для определения частотной погрешности Δf_x в зависимости от поперечных смещений Δx_i деталей оптической системы введем эти смещения в выражение (2). Учитывая гомоцентричность оптической системы, пространственную частоту f_x дифракционного изображения (5) щели в плоскости $x_3 y_3$ спектрального анализа можно представить в виде

$$f_x = -\frac{\Delta x_0}{\lambda l_{01}} + \frac{\Delta x_2}{\lambda l_{12} f \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)} + \frac{x_3}{\lambda l_{12} l_{23} \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)}. \quad (12)$$

Поскольку Δx_0 и Δx_2 являются величинами малыми по сравнению с геометрическими размерами оптической системы и входят в выражение (12) в первой степени, коэффициенты при них являются соответствующими функциями влияния. Продифференцировав выражение (12) по x_3 , получим функцию влияния поперечного смещения Δx_3 . Тогда частотная погрешность Δf_x дифракционного изображения в зависимости от поперечных смещений Δx с учетом условия фокусировки (3) будет равна

$$\Delta f_x = -\frac{1}{\lambda l_{01}} \Delta x_0 + \frac{l_{01} + l_{12}}{\lambda f l_{01}} \Delta x_2 + \frac{l_{01} + l_{12} - f}{\lambda f l_{01}} \Delta x_3. \quad (13)$$

Функция $k_{\Delta x_0}^f = -\frac{1}{\lambda l_{01}}$ определяется только дли-

ной волны λ и радиусом l_{01} фронта освещающей волны и стремится к нулю при $l_{01} \rightarrow \infty$, что соответствует плоской волне на входе. Это объясняется тем, что лишь при плоской волне распределение энергии равномерно по полю входного транспаранта, вследствие чего смещение Δx_0 не искажает распределения светового поля в плоскости $x_3 y_3$ спектрального анализа.

Функция $k_{\Delta x_2}^f$ зависит от параметров l_{01} и l_{12} и стремится к нулю при $l_{01} + l_{12} = 0$; при этом $l_{23} = 0$, т.е. все детали оптической системы расположены во входной плоскости, что физически нереализуемо и практически невозможно. С увеличением l_{12} функция $k_{\Delta x_2}^f$ возрастает, а с увеличением l_{01} стремится к $\frac{1}{\lambda f}$. Функция $k_{\Delta x_3}^f$ также линейно зависит от l_{12} , а при $l_{12} = f$ не зависит от l_{01} и стремится к $\frac{1}{\lambda f}$.

Таким образом, частотная погрешность Δf_x вследствие поперечных смещений (децентрирования) Δx_i деталей оптической системы КОС неустраняема лишь выбором геометрических размеров оптической системы. Физически она выражает линейное смещение всего дифракционного изображения независимо от пространственных частот в плоскости спектрального анализа. Кроме того, поскольку Δf_x не зависит от f_x согласно выражению (13), искажение масштаба не происходит. Для устранения этого смещения необходимо за центр системы координат плоскости спектрального анализа выбирать положение нулевого максимума дифракционного изображения.

Рассмотрим влияние перекосов γ_i деталей оптической системы на погрешности дифракционного изображения. Поскольку источник излучения точечный, поворот его на угол γ_0 в плоскости $x_0 y_0$ не влияет на распределение светового поля в плоскости $x_3 y_3$ спектрального анализа, поэтому $k_{\gamma_0}^a = 0$, $k_{\gamma_0}^f = 0$. Поворот эталонного объекта (щели) вокруг оси y_1 на угол γ_1 приводит к изменению его функции $t(x_1)$ пропускания:

$$t(x_1) = \begin{cases} 1 & \text{при } |x_1| \leq \frac{b}{2 \cos \gamma_1}; \\ 0 & \text{в других случаях.} \end{cases} \quad (14)$$



Подставив выражение (14) в формулу (2), получим, что интенсивность m -го максимума дифракционного изображения описывается выражением

$$I_m = \frac{A_0^2 b^2 M_m}{\lambda^4 l_0^2 l_{12}^2 l_{23}^2 \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)^2} \frac{1}{\cos^2 \gamma_1}, \quad (15)$$

а пространственные частоты f_x в плоскости $x_3 y_3$ спектрального анализа

$$f_x = \frac{\cos \gamma_1}{\lambda l_{12} l_{23} \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)} x^3. \quad (16)$$

Продифференцируем уравнения (15) и (16) по γ_1 :

$$\frac{\partial I_m}{\partial \gamma_1} = \frac{A_0^2 b^2 M_m}{\lambda^4 l_0^2 l_{12}^2 l_{23}^2 \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)^2} \frac{2 \sin \gamma_1}{\cos^2 \gamma_1}; \quad (17)$$

$$\frac{\partial f_x}{\partial \gamma_1} = \frac{\sin \gamma_1}{\lambda l_{12} l_{23} \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)} x^3. \quad (18)$$

Поскольку $\frac{\partial I_m}{\partial \gamma_1} \Delta \gamma_1$ и $\frac{\partial f_x}{\partial \gamma_1} \Delta \gamma_1$ являются первыми

членами разложения функций $I_m(\gamma_1)$ и $f_x(\gamma_1)$ в ряд Тейлора вблизи точки $\gamma_1 = 0$, то, подставив это значение угла γ_1 в формулу (17) и (18), получим, что $k_{\gamma_1}^a = 0$ и $k_{\gamma_1}^f = 0$ (в пределах линейной теории точно).

Поворот Фурье-объектива на угол γ_2 в плоскости $x_2 y_2$ идентичен падению на него наклонного плоского светового пучка, распределение комплексных амплитуд которого в плоскости $x_2 y_2$

$$U(x_2) = e^{jkx_2 \operatorname{tg} \gamma_2},$$

а фазовое преобразование Фурье-объектива выражается его коэффициентом пропускания:

$$T_\lambda(x_2) = e^{jk \left(\frac{x_2^2}{2f} - x_2 \operatorname{tg} \gamma_2 \right)}. \quad (19)$$

Подставив выражение (19) в формулу (2) вместо $e^{\frac{jkx_2^2}{2f}}$ найдем, что пространственные частоты f_x дифракционного изображения в плоскости спектрального анализа описываются выражением

$$f_x = \frac{x^3}{\lambda l_{12} l_{23} \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)} + \frac{\operatorname{tg} \gamma_2}{\lambda l_{12} \left(\frac{1}{l_{12}} + \frac{1}{l_{23}} - \frac{1}{f} \right)}. \quad (20)$$

Функцию $k_{\gamma_2}^f$ с учетом условия фокусировки (3) определим, продифференцировав уравнение (20) по γ_2 :

$$k_{\gamma_2}^f = \frac{l_{01} + l_{12}}{\lambda l_{01}}.$$

Таким образом, частотная погрешность Δf_x вследствие перекоса Фурье-объектива на угол $\Delta \gamma_2$ является постоянной и выражается в сдвиге на величину $\frac{l_{01} + l_{12}}{\lambda l_{01}}$ дифракционного изображения без

искажения его масштаба; при $l_{01} \rightarrow \infty$ $k_{\gamma_2}^f = \frac{1}{\lambda}$ и не зависит от l_{12} .

Выводы

Полученные в результате исследований функции влияния погрешностей юстировки КОС приведены в таблице. Анализ этих функций позволяет сделать следующие выводы:

1) погрешность ΔI_m интенсивности возникает лишь вследствие продольных дефокусировок $\Delta l_{i, i+1}$ деталей оптической системы и устраняема соответствующим выбором ее геометрических параметров $l_{01}, l_{12}, l_{23}, f$; эта погрешность минимальна при плоском фронте освещающей световой волны, т.е. $l_{01} \rightarrow \infty$, а сам объект расположен в передней фокальной плоскости Фурье-объектива ($l_{12} = f$);

2) погрешность Δf_x пространственной частоты при выполнении перечисленных условий зависит только от длины волны λ излучения лазера и фокусного расстояния f Фурье-объектива и уменьшается с ростом λ и f ; при $l_{01} \rightarrow \infty$ и $l_{12} = f$ искажение масштаба дифракционного изображения отсутствует и погрешность Δf_x пространственной частоты f_x проявляется в сдвиге всего дифракционного изображения по плоскости спектрального анализа.

Библиографический список

1. Акаев А.А., Майоров С.А. Оптические методы обработки информации. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2005. 260 с.
2. Назаров В.Н., Соколов Ю.А. Исследование схемы дифракционного контроля положений объектов с изменяющимся масштабом спектра Фурье // Науч.-техн. вест. СПбГУ ИТМО. 2011. № 1 (71). С. 6–9.
3. Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Нгуен К.А. Определение обобщенных характеристик когерентных спектроанализаторов // Научные вестники НТУУ "КПИ". 2012. № 5. С. 102–108.

УДК 681.2.002.72;681.2.002

Ю.В. Денисов, д-р техн. наук (Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина),

М.В. Капленко, канд. техн. наук (Уральский электромеханический завод, г. Екатеринбург)

E-mail: k-14627@planet-a.ru

Улучшение процесса сборки прецизионного интегрирующего акселерометра

Для уникального прибора определены функциональные характеристики, установлены критические конструктивные параметры и параметры технологического процесса. Обеспечение качества сборки достигается уменьшением вариаций параметров процесса на всех этапах. С использованием математической модели выбраны управляющие параметры процесса сборки, обеспечивающие получение требуемых функциональных характеристик. Модель позволяет реализовать процесс виртуальной сборки для реального комплекта деталей.

This research defines functional characteristics of the unique instrument, sets critical design parameters and technology. High quality of assembly is guaranteed through reduction of multi-optional parameters during all stages of the assembly process. Critical management variables are defined with mathematical modeling, which guarantees the end-goal achieving required functional specifications. Proposed model allows for virtual assembly of the instrument, which can be applied to real-time assembly.

Ключевые слова: интегрирующий акселерометр, управляющий параметр, процессный подход, совершенствование сборки.

Keywords: precision integrating accelerometer, management variable, system approach, assembly improvement.

Постановка задачи

Рассмотрим возможность улучшения процесса сборки и настройки прецизионного акселерометра оригинальной конструкции. Использование разработанных рекомендаций существенно уменьшает длительность сборки и регулировки, сокращает производственные расходы.

В данной статье использованы подходы к совершенствованию процесса сборки, рассмотренные

подробно в работе [1] и применены результаты математического моделирования систем прибора, приведенные в работе [2]. Содержание материала данной статьи позволяет утверждать об общности предлагаемого подхода к анализу процесса сборки различных типов инерционных приборов, обеспечивающего повышение эффективности их производства.

Предмет исследования

Конструкция интегрального акселерометра с чувствительным элементом, совершающим вращательное движение, показана на рис. 1. Принцип его работы состоит в следующем. В начальный момент времени чувствительный элемент 3 удерживается в исходном положении силами магнитного взаимодействия первого 1 и второго 2 устройств регулирования. При воздействии на него силы, обусловленной переносным ускорением \vec{a}_e , в направлении, показанном на рис. 1, и достижении им заданного уровня, чувствительный элемент переходит из состояния покоя в состояние движения. Во время движения на чувствительный элемент действуют силы магнитного тормоза 5, передающиеся через зубчатую передачу 6, второго 2 и третьего 8 устройств регулирования. Чувствительный элемент находится на одной оси с подвижной контактной группой 4, поэтому происходит коммутация электрических цепей контактов 7 при повороте чувствительного элемента на заданный угол.

Анализ разработанной математической модели акселерометра, его критических конструктивных параметров позволяет отметить следующее:

а) срабатывание прибора должно происходить при постоянном значении его скорости, вне зависимости от закона нарастания ускорения;

б) в разработанной математической модели основной величиной является время интегрирования ускорения, позволяющее получить значение ско-

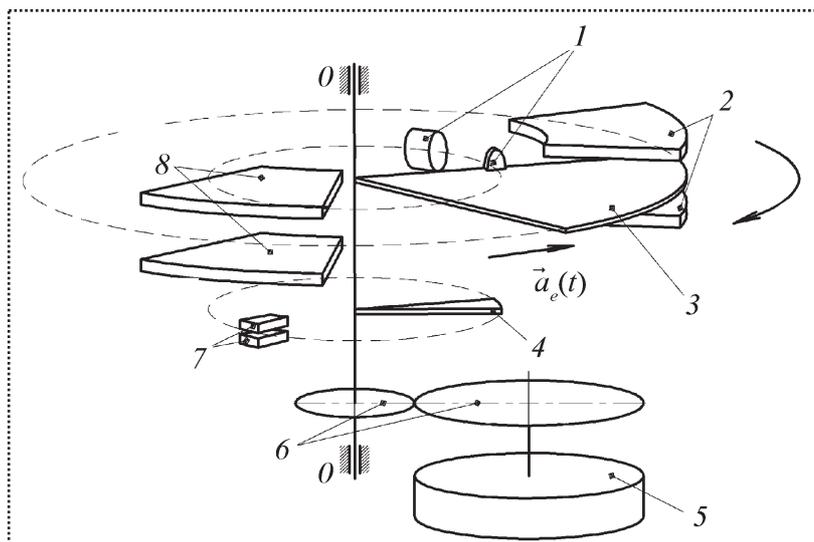


Рис. 1. Инерционный интегрирующий акселерометр с чувствительным элементом, совершающим вращательное движение:

1 – первое устройство регулирования; 2 – второе устройство регулирования; 3 – чувствительный элемент; 4 – подвижная контактная группа; 5 – магнитный тормоз; 6 – зубчатая передача; 7 – контакты; 8 – третье устройство регулирования; O – ось вращения чувствительного элемента

рости прибора (при которой происходит срабатывание) при различных законах изменения ускорения;

в) время интегрирования получено решением нелинейного дифференциального уравнения движения чувствительного элемента прибора.

С использованием разработанной модели прибора можно рекомендовать следующую последовательность совершенствования процесса сборки.

1. Зная связь функциональных характеристик прибора с критичными конструктивными параметрами, установить настроечные параметры прибора и управляющие параметры процесса сборки.

2. Используя аналитические зависимости установить количественные соотношения между настроечными и управляющими параметрами.

3. Установить область допустимых значений управляющих параметров, обеспечивающих возможные значения настроечных параметров и требуемые функциональные характеристики прибора.

Связь настроечных параметров прибора с управляющими параметрами технологического процесса сборки и настройки

Управляющие параметры, определяющие момент сопротивления второго регулирующего уст-

ройства, показаны на рис. 2. Такими управляющими параметрами являются зазоры B_3 , B_3 между чувствительным элементом и полюсами постоянного магнита.

Управляющие параметры, определяющие момент сопротивления магнитного тормоза, показаны на рис. 3. К ним относятся зазоры Φ_1 и Ψ_1 между ротором и полюсными наконечниками постоянного магнита.

Соответственно, на рис. 4 показана ширина обечайки C ротора магнитного тормоза – часто используемый параметр, влияющий на коэффициент торможения.

К настроечным параметрам, определяющим функциональные характеристики прибора относятся момент сопротивления второго устройства регулирования, напряженность поля в зазоре магнитного

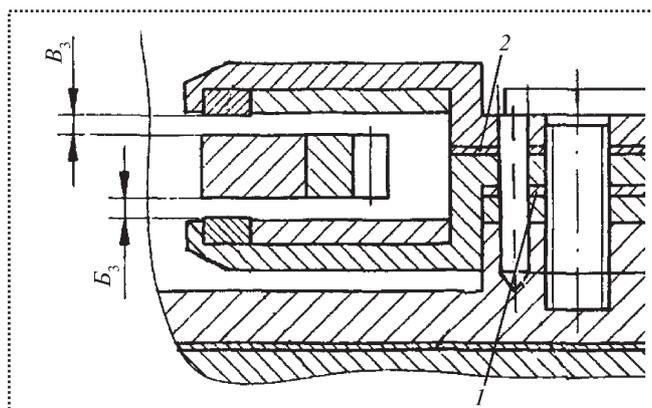


Рис. 2. Управляющие параметры для второго регулирующего устройства:

1 – первая группа прокладок; 2 – вторая группа прокладок

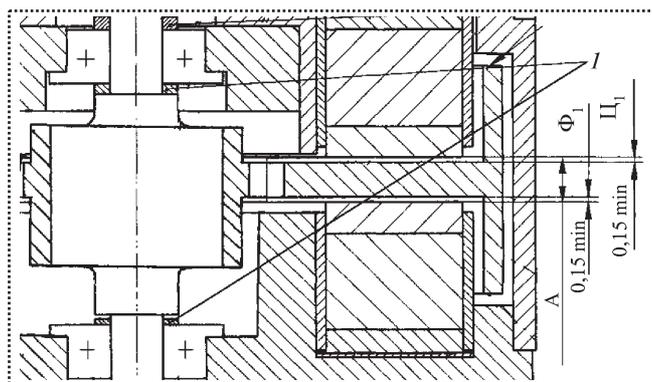


Рис. 3. Управляющие параметры магнитного тормоза

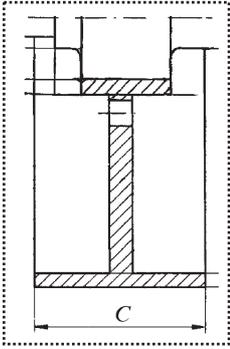


Рис. 4. Управляющий параметр магнитного тормоза

тормоза, коэффициент торможения магнитного тормоза.

К управляющим параметрам процесса сборки могут быть отнесены зазоры во втором устройстве регулирования, зазоры в магнитном тормозе и геометрический размер обечайки ротора магнитного тормоза. Значения зазоров определяют напряженность магнитного поля в зазоре и, соответственно, коэффициент сопротивления устройства регулирования и магнитного тормоза. Изменяют зазор с помощью прокладок, магнитные свойства и размеры

которых учитывают при расчете магнитного привода.

Количественные соотношения между настроечными параметрами и управляющими параметрами технологического процесса сборки и настройки прибора установлены в табл. 1.

Совершенствование процесса сборки интегрирующего акселерометра

Предложения по совершенствованию процесса сборки интегрирующего акселерометра разработаны с использованием количественных соотношений между настроечными и управляющими параметрами.

1. Предложение по уточнению операции настройки при сборке второго устройства регулирования.

Таблица 1

Настроечные параметры прибора и управляющие параметры процесса

Параметр		Существующая технология, обеспечивающая получение функциональной характеристики	Область изменения управляющих параметров	Погрешность величины скорости срабатывания, %, при значении	
настроечный	управляющий			минимальном	максимальном
Момент сопротивления второго регулирующего устройства	Зазоры B_3 , B_3 (рис. 2) между магнитами и сектором чувствительного элемента	Использование двух групп прокладок: 1) для обеспечения зазора B_3 толщиной от 0,05...0,5 мм; 2) зазора B_3 толщиной от 0,05...0,5 мм и двух типов материалов прокладок бронзовых сплавов и 80НХС. Данные прокладки обеспечивают также регулирование магнитной индукции так как изменяют структуру магнитопровода	Зазор $B_{3 \min} = 0,2$ мм, $B_{3 \min} = 0,3$ мм; при этом $B_3 - B_3 \geq 0,1$ мм	0	3
Напряженность в зазоре магнитного тормоза	Зазоры Φ_1 , Ψ_1 (рис. 3) между полюсными наконечниками и ротором магнитного тормоза	Использование прокладки для обеспечения зазоров магнитного тормоза Φ_1 , Ψ_1 толщиной от 0,03...0,35 мм	Min $\Phi_1 - \Psi_1 = 0,15$ мм	0	2
Коэффициент торможения магнитного тормоза	Ширина обечайки C (рис. 4) ротора магнитного тормоза	Использование одного из трех типов роторов	Ширина параметра C : 6,6; 5,6; 4,6 мм	6	0

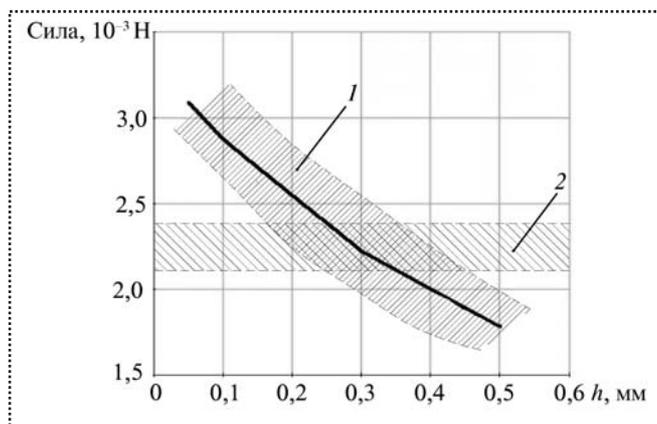


Рис. 5. Зависимость силы, прилагаемой к устройству регулирования при настройке от толщины h установленной прокладки: 1 – область значений реальной настройки; 2 – область требуемых значений

На данной операции регулируют зазоры B_3 , V_3 (см. рис. 2) в целях изменения момента, с которым второе устройство регулирования действует на чувствительный элемент. В процессе настройки момент второго устройства регулирования контролируется приложением к контрольному отверстию в чувствительном элементе силы заданной величины. Для сокращения времени настройки необходимо установить связь значения зазоров B_3 , V_3 с моментом устройства регулирования и значением силы, контролируемой в точке.

Разработанные математические зависимости позволяют построить графики зависимости силы, которую необходимо приложить в контрольной точке, от значений зазоров B_3 , V_3 . На рис. 5 приведены графики с учетом различных комбинаций установки прокладок, при этом отклонение магнитных свойств материалов магнитов находятся в рамках требований технологической документации.

Графики иллюстрируют зависимость силы, которую необходимо приложить к технологическому отверстию (расположенному в контрольной точке) при настройке второго устройства регулирования от толщины установленной прокладки.

При настройке величины силы, развиваемой вторым устройством регулирования, необходимо учитывать ее влияние на погрешность срабатывания прибора. На рис. 6 приведена зависимость погрешности срабатывания прибора от величины

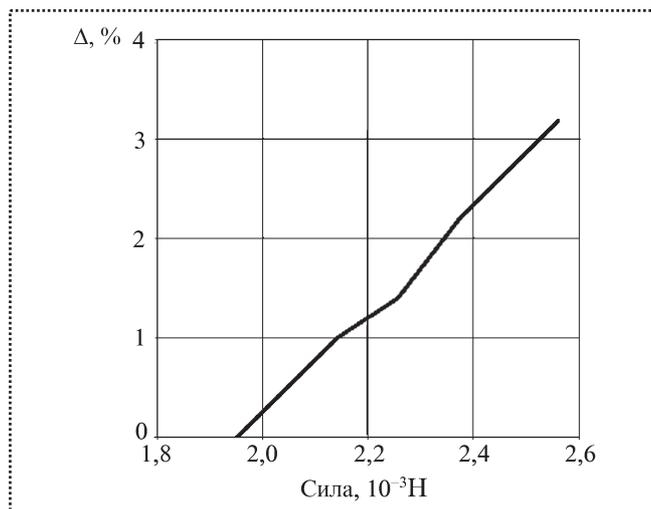


Рис. 6. Зависимость погрешности Δ срабатывания прибора от силы, прилагаемой к контрольной точке при настройке второго устройства регулирования

силы, прилагаемой к контрольной точке при настройке второго устройства регулирования.

Полученные данные позволяют сократить время операций настройки второго устройства регулирования, а при использовании новой партии магнитных материалов магнитов уменьшить это время почти вдвое.

2. *Предложение по уточнению регулировочной операции при сборке магнитного тормоза.*

При выполнении данной операции регулируют зазоры Π_1 , Φ_1 (см. рис. 3) для повышения точности настройки прибора и сокращения времени, затрачиваемого на нее. При этом установлено, как данная регулировка влияет на значение коэффициента торможения магнитного тормоза и в итоге на погрешности срабатывания прибора.

Регулируемые зазоры являются составными частями зазора А (см. рис. 3). Фактическое значение зазора А (с учетом истинных значений Π_1 , Φ_1) вычисляется по формулам, приведенным в технологическом процессе. Полученная модель позволяет оценить влияние зазора А на коэффициент торможения магнитного тормоза (рис. 7). Соответственно выполняется прогнозирование сборочного параметра и появляется возможность проведения корректировки значения коэффициента торможения.

3. *Предложение по уточнению регулировочной операции коэффициента торможения магнитного тормоза при сборке.*

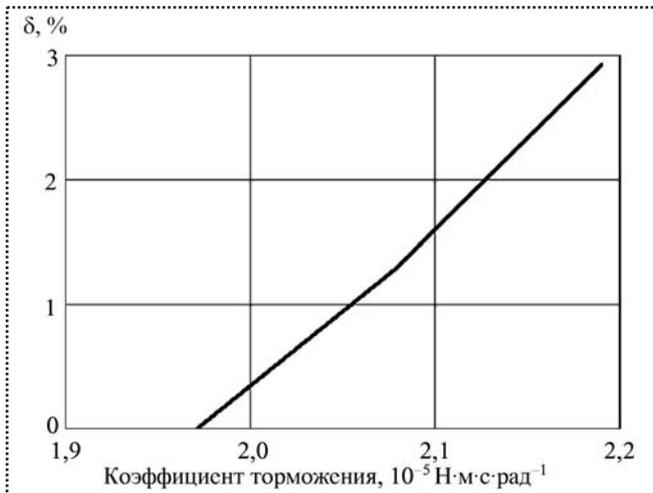


Рис. 7. Зависимость погрешности срабатывания δ от коэффициента торможения магнитного тормоза

Одним из управляющих параметров при настройке коэффициента торможения магнитного тормоза является ширина обечайки ротора (см. рис. 4). Для обоснованного принятия решения о замене, выборе этого управляющего параметра необходимо оценить влияние ширины обечайки ротора на погрешность срабатывания прибора. Полученные результаты представлены в табл. 2.

Использование данных табл. 2 позволяет прогнозировать изменение погрешности ускорения срабатывания прибора, выбирать более оптимальный путь настройки и сокращать временные затраты на настройку прибора.

Предложения по уточнению технологической операции при настройке коэффициента торможения магнитного тормоза (применение одного из трех допустимых вариантов ширины обечайки ротора) и по уточнению регулировочной операции при сборке магнитного тормоза дают возможность сократить время настройки прибора.

Таблица 2

Погрешность ускорения срабатывания ротора

Параметр C , мм	Масса ротора, г	Погрешность ускорения срабатывания, %
6,6	5,49	0
5,6	5,18	3,5
4,6	4,86	6,0

Вывод

Использование рекомендаций по совершенствованию процесса сборки и настройки интегрирующего акселерометра в производственных условиях позволило:

- 1) сократить время сборки и настройки на 10 % (рис. 8 на стр. 3 обложки);
- 2) обеспечить стабильность процесса сборки и настройки.

Библиографический список

1. Денисов Ю.В., Капленко М.В. Математическое моделирование при сборке прецизионных датчиков ускорения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2014. № 2. С. 27–31.
2. Денисов Ю.В., Капленко М.В. Критичные конструктивные параметры интегральных акселерометров // Фундаментальные исследования. 2013. № 10 (Ч. 8) С. 1689–1693.

К сведению читателей!

В журнале № 12 за 2013 г. в статье А.П. Лукинова и А.Н. Сыромятина "Оптимизация и оценка робастности силовых замыканий антропоморфной сборочной оснастки" в результате технического сбоя появилась ошибка. Над векторными величинами вместо знака вектора напечатались буквы r или v . Ошибка носит систематический характер по всей статье. Следует вместо букв r и v , помещенных над обозначением величины, читать знак вектора, например, вместо $F - \overline{F}$.

Редакция



УДК 62-531.2

Д.А. Осипович, С.Г. Ярушин, д-р техн. наук (Пермский национальный исследовательский политехнический университет),

С.А. Червоных (ОАО "Авиадвигатель", Пермь)

E-mail: daria.osipovich.purpu@gmail.com

Анализ направлений модернизации методики определения фактической площади проходного сечения соплового аппарата по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS*

Проанализированы возможные пути совершенствования и автоматизации методики расчета фактической площади проходного сечения соплового аппарата по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS, разработанной ОАО "Авиадвигатель". Предложен принцип действия мультимасштабной оптической системы оцифровки для получения моделей крупногабаритных сопловых аппаратов. Представлены способы автоматизации следующих этапов методики: выбор участков оцифрованной поверхности и определение границ проходного сечения.

Possible improvement and automation paths for technique for set of nozzles actual open flow area based on data from digitizing using optical measurement system ATOS developed by "Aviadvigatel" Stock Company were analyzed. Functional principle of multi-scale optical digitizing system for large-sized set of nozzles modeling is suggested. Automation paths of the technique stages including digitizing surface sites selection and open flow area edges determination were suggested.

Ключевые слова: оптическая оцифровка, автоматизация измерений, площадь проходного сечения, качество сборки.

Keywords: optical digitizing, measurement automation, open flow area, assembly quality.

Увеличение ресурса и надежности авиационных двигателей — важнейшие направления исследований в области их проектирования и производства.

* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0016) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 "О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства".

Помимо совершенствования конструктивных решений для решения этих задач повышают качество изготовления и сборки.

Одной из причин возникновения избыточных динамических нагрузок на лопатки турбины является неравномерность газодинамических потоков по единичным трактам. Динамическая сбалансированность ротора турбины авиационного двигателя зависит как от точности изготовления отдельных комплектующих, так и от качества сборки.

Для изготовления комплектующих, формирующих газовый тракт, применяют самое современное производственное оборудование, обеспечивающее минимальную погрешность получения линейных размеров, и системы автоматизированного проектирования, обеспечивающие точность многоосевого позиционирования инструмента относительно сложной криволинейной поверхности детали.

Тем не менее, как показала практика, сборочные контуры, образованные лопатками и кольцами, не обеспечивают заданных конструкторской документацией ограничений в отклонении площади проходных сечений между лопатками, даже если все комплектующие по отдельности выполнены в полном соответствии с предъявляемыми требованиями.

Дальнейшее ужесточение требований к изготовлению отдельных деталей авиационных турбин приведет к чрезмерному удорожанию производства, поэтому предлагается для решения выявленной проблемы прибегнуть к исследованию другого технологического аспекта обеспечения качества изготавливаемых турбин — качества процессов сборки. Для нахождения оптимальной схемы установки реальных лопаток в одном из узлов газодинамического тракта необходимо иметь способ, позволяющий бы-

стро и с высокой точностью проконтролировать фактические значения площади проходного сечения для каждого межлопаточного канала.

Производство двигателей уже оснащают автоматизированными комплексами, включающими оборудование для выполнения контрольных операций. Основными целями внедрения автоматизированных комплексов были повышение точности и повторяемости результатов измерений, сокращение времени, унификация технологических процессов контроля. Однако опыт их эксплуатации показал, что простая замена ручных средств измерения на автоматизированные не приносит ожидаемых результатов. Основная проблема заключается в том, что зачастую для объектов со сложной геометрией данные, полученные в результате измерений с использованием современных технических средств, приходится обрабатывать вручную для получения окончательного заключения о фактических размерах контролируемого объекта.

Использование единой модели изделия на всех этапах производственного цикла, включая контрольные операции, позволяет в автоматизированном режиме выполнять проверку большого числа его параметров, в том числе косвенных. Для узлов турбины авиационного двигателя, например, сопловых аппаратов (рис. 1), важнейшим из таких параметров, определяющих комплексный показатель качества, является площадь проходного сечения. Первичный расчет ее значения выполняют в процессе проектирования при моделировании происходящих в сопловом аппарате газодинамических процессов, причем формулируют не только численное значение площади, но и пространствен-

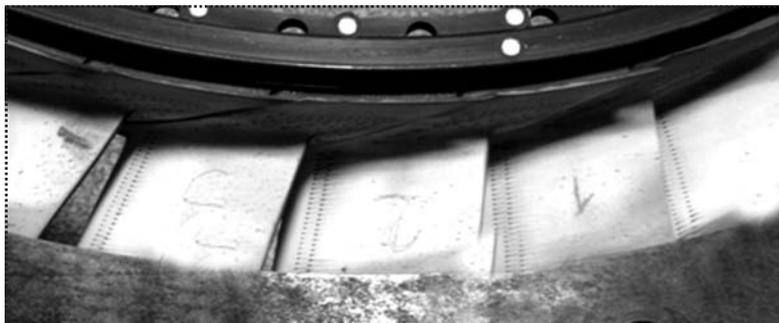


Рис. 1. Фрагмент соплового аппарата, установленного в оснастку и подготовленного к выполнению оцифровки с помощью системы ATOS II

ное положение проходного сечения относительно геометрических элементов соплового аппарата.

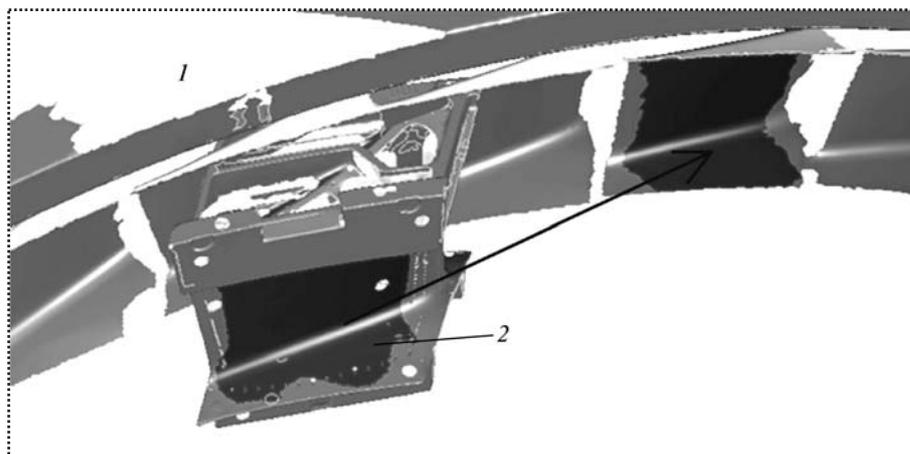
В качестве объекта для автоматизации выбрана методика расчета фактической площади проходного сечения соплового аппарата (межлопаточных каналов лопаток) по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS II и применением программного обеспечения Geomagic Qualify [1], которые используются в опытном производстве. Данная методика содержит значительное число неавтоматизированных операций. Качество и время выполнения этих операций полностью зависит от квалификации пользователя. Поскольку каждая из них многократно выполняется для отдельного соплового аппарата, предполагается, что при замене ручной обработки данных программным алгоритмом требуемое время существенно сократится. То, что все исходные данные для расчета, получаемые с помощью оцифровки на измерительном комплексе ATOS II, представляются в виде компьютерной 3D модели, позволяет сделать вывод о том, что методика имеет достаточно высокий потенциал автоматизации.

В результате анализа методики расчета фактической площади проходного сечения соплового аппарата по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS II и программном обеспечении Geomagic Qualify были выявлены следующие потенциальные направления совершенствования:

- разработка компоновки мультимасштабной системы оцифровки, позволяющей получать с высокой точностью модели крупногабаритных объектов, содержащих мелкие элементы;
- автоматизация процедуры определения участков поверхности, формирующих границы проходного сечения;
- автоматизация пространственного положения поверхности измеряемого проходного сечения относительно элементов геометрии контролируемого соплового аппарата;
- подготовка данных измерения фактической площади проходного сечения соплового аппарата для дальнейшей обработки.

Рассмотрим подробнее каждое из этих направлений, соответствующие им исход-

Рис. 2. Совмещение модели 2 отдельной лопатки, полученной с высокой точностью, и упрощенной модели 1 соплового аппарата по принципу наилучшего совпадения выбранных поверхностей [1]



ные данные из базовой методики и возможные пути автоматизации с использованием задействованных в ней средств измерений и программных продуктов.

Первым этапом выполнения методики является подготовка исходных данных для расчета путем оптической оцифровки соплового аппарата на измерительном комплексе ATOS II. Основной проблемой этого этапа является противоречие между требуемой точностью отображения в модели элементов геометрии соплового аппарата и габаритными размерами.

Для обеспечения заявленной в документации точности измерений отдельные измерения должны перекрываться с максимальной степенью (по крайней мере, на 30...40 %) и могут не более чем в три раза превышать предельный измеряемый объем для выбранного комплекта камер ATOS, называемый *измерительным объемом* [2]. Следовательно, невозможно получить оцифрованную модель крупногабаритного соплового аппарата с высокой точностью отображения всех поверхностей.

Для решения этой проблемы используют оцифровку контролируемого объекта в два этапа: оцифровка отдельных лопаток с использованием наименьшего из доступных измерительных объемов, характеризующегося самой высокой точностью, и оцифровка соплового аппарата в сборе с использованием наибольшего из доступных измерительных объемов. После чего оцифрованные модели отдельных лопаток накладывают на поверхность модели соплового аппарата по принципу наилучшего совпадения (рис. 2).

Точность совмещения поверхностей контролирует стандартное программное средство определения отклонения между точками поверхностей моделей. Если отклонение во всех точках не превышает допустимого, заявленного в документации для наибольшего из использованных объемов, то совмещение считается выполненным верно. Если после многократного перепозиционирования моделей лопаток требуемое значение отклонения не получено, то превышение допуска прибавляется к общей погрешности измерений.

Для исключения данной компоненты погрешности предлагается воспользоваться возможностью использования опорных точек-маркеров определенного диаметра с различными измерительными объемами и выполнять совмещение поверхности лопаток, полученной с высокой точностью и единой сетки опорных точек для соплового аппарата в сборе, полученной с допустимым перекрытием в результате использования большего измерительного объема.

Основное условие выбора диаметра опорных точек заключается в том, что диаметры опорных точек (эллипсов, видимых в перспективном виде), регистрируемых изображениями камер, должны составлять, по крайней мере, 6...10 пикселей для того, чтобы система могла их автоматически идентифицировать с хорошим качеством [2]. Таким образом, оба этапа оцифровки контролируемого соплового аппарата выполняют уже после сборки.

На первом этапе с использованием наибольшего из возможных измерительных объемов создают сетку опорных точек, на которую на втором этапе

накладывают участки поверхности. В результате получается единственная модель отсканированной поверхности соплового аппарата, не нуждающаяся в дополнительной ручной обработке. Результирующая погрешность при использовании такой схемы оцифровки, так же как в исходном варианте, соответствует допустимому отклонению наибольшего из использованных измерительных объемов. Исключается необходимость ручного позиционирования и привязки моделей отдельных лопаток в общей схеме соплового аппарата, а также сопутствующая ей возможная погрешность, сокращается время обработки оцифрованного файла.

Итоговая фасетная модель оцифрованной поверхности хранится в STL-файле, который в силу особенностей структуры данных имеет чрезвычайно большой объем, что делает невозможным эффективную работу с ним в системе трехмерного моделирования. Для упрощения работы с STL-файлом из модели удаляют все участки поверхности, не участвующие в формировании границ проходного сечения.

Выбор удаляемых участков выполняют исключительно на основе опыта оператора, причем негативное значение могут иметь как излишнее удаление, захватывающее участки поверхности, формирующие проходное сечение, так и недостаточное удаление, оставляющее большой объем данных, затрудняющий манипулирование моделью.

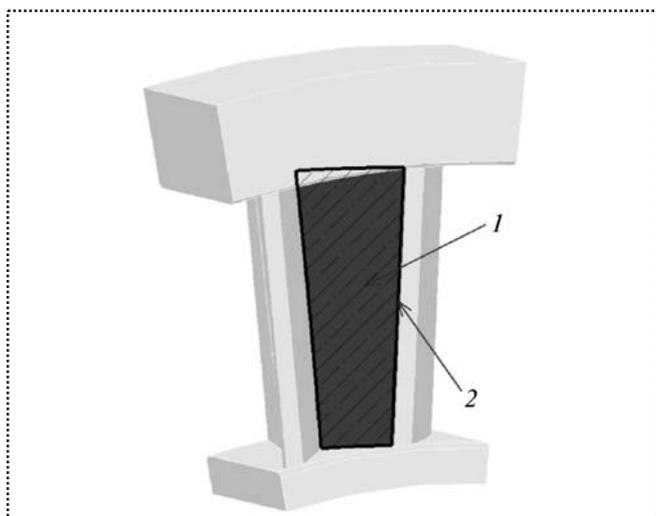


Рис. 3. Теоретическая поверхность 1 проходного сечения (заштриховано) и его границы 2

Для автоматизации данного подготовительного этапа обработки оцифрованной модели в первую очередь необходимо выполнить разметку поверхностей. Теоретически для определения границ поверхности проходного сечения достаточно кольцевого фрагмента поверхности, проходящего через лопатки и ограничивающего кольца вдоль предполагаемой линии пересечения. Ширина данного фрагмента равняется допуску на взаимное расположение. Граница проходного сечения проходит на расстоянии около 1 мм от выходной кромки со стороны корыта, на поверхности спинки в месте проецирования предыдущего участка по нормали к поверхности, а также по наружному и внутреннему ограничивающим кольцам (рис. 3).

Опыт практической работы с фасетными поверхностями показывает, что такого кольцевого участка поверхности недостаточно для полного определения границ проходного сечения. Это вызвано особенностями структуры фасетной поверхности, состоящей из треугольников различного размера, при удалении которых на теоретической линии контура могут образовываться разрывы. Для того чтобы избежать их возникновения предлагается определить ширину кольцевого участка поверхности, используемого при построении границ проходного сечения, в зависимости от габаритов лопатки. Этот участок должен перекрывать заданный конструктором допуск на отклонение поверхности от номинального положения, но при этом обеспечивать отсечение большей части поверхности лопатки, не задействованной в формировании границ проходного сечения.

После определения требуемой ширины кольцевой поверхности предлагается на основании номинальной модели контролируемого соплового аппарата выполнить комплект поверхностей простой канонической формы, линии пересечения с которыми позволят разграничить оцифрованную фасетную поверхность фактической модели на области, участвующие в формировании проходного сечения и не участвующие.

Для сопловых аппаратов, конструкция которых аналогична рассматриваемым в методике, в этот комплект поверхностей должны входить две цилиндрические поверхности, исключаяющую большую часть поверхности ограничивающих колец, и

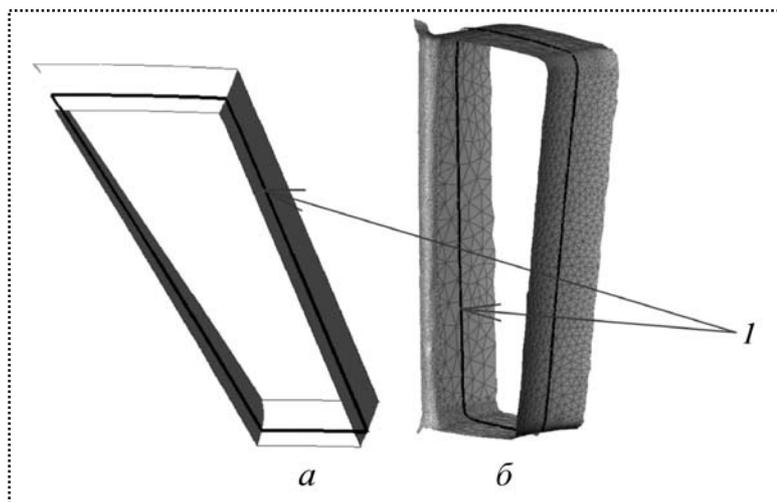


Рис. 4. Теоретическая (а) и фактическая (б) модели поверхности соплового канала после отсечения неиспользуемых участков с помощью ограничивающих поверхностей с указанием положения границы 1 проходного сечения

по две плоскости для каждой пары смежных лопаток, параллельные поверхности проходного сечения и отсекающие неиспользуемые участки поверхности лопаток.

В результате отсечения остается небольшой замкнутый участок оцифрованной поверхности, который гарантированно содержит необходимую информацию для определения границ проходного сечения (рис. 4).

Вторая часть методики расчета фактической площади проходного сечения соплового аппарата описывает порядок действий при непосредственном извлечении из оцифрованной модели соплового аппарата информации о границах проходного сечения и заключенной между ними площади. В ней все действия выполняют относительно блока, состоящего из пары лопаток, содержащего полную информацию обо всех поверхностях, независимо от их участия в формировании границ проходного сечения. В методике нет указаний как на ограничения, связанные с неполнотой данных после отсечения неиспользуемых поверхностей, так и на особенности работы с оцифрованными моделями собранных сопловых аппаратов.

Поскольку номенклатура инструментов для работы с фасетными поверхностями существенно ограничена по сравнению с номенклатурой инструментов создания параметрических моделей, в рассматриваемой методике непосредственно после

импортирования выполняется дублирование участка фасетной поверхности лопатки В-поверхностью посредством сплайнов (рис. 5).

Общая тенденция, обозначенная на примере двух рассмотренных операций (отсечение неиспользуемых участков поверхности и дублирование границ сечения сплайнами), – наличие в алгоритме проведения расчета по рассматриваемой методике большого количества действий, выполняемых оператором вручную и "на глаз".

В основе предлагаемой автоматизации действий по расчету фактической площади проходного сечения по данным оцифровки лежит возможность построения кривой пересечения фасетной поверхности и поверхности, заданной параметрически. Если в графическом программном пакете, используемом при обработке оцифрованных моделей,

есть такая возможность, то определение границ проходного сечения, лежащих на поверхности лопаток соплового аппарата и ограничивающих колец, сводится к совмещению в едином координатном пространстве данных оцифровки и заранее подготовленной поверхности, описывающей проходное сечение, их пересечению и определению площади поверхности, отсеченной полученной кривой (рис. 6).

Несмотря на то, что данный способ определения площади, так же как и исходная методика, предусматривает отдельное рассмотрение каждой пары лопаток и проходного сечения между ними, получаемая кривая границы проходного сечения формируется в автоматическом режиме и не зависит от корректности действий оператора.

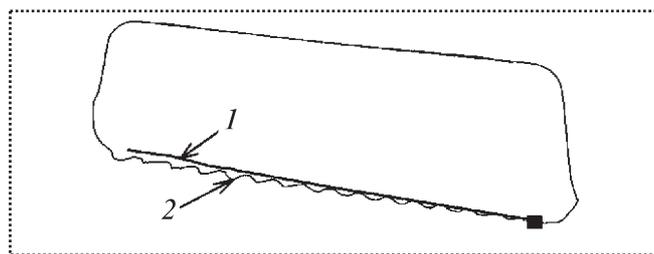


Рис. 5. Замена участка кривой 2 пересечения предполагаемой плоскости проходного сечения с фасетной поверхностью модели пера лопатки вписанным сплайном 1 для построения окончательной поверхности проходного сечения

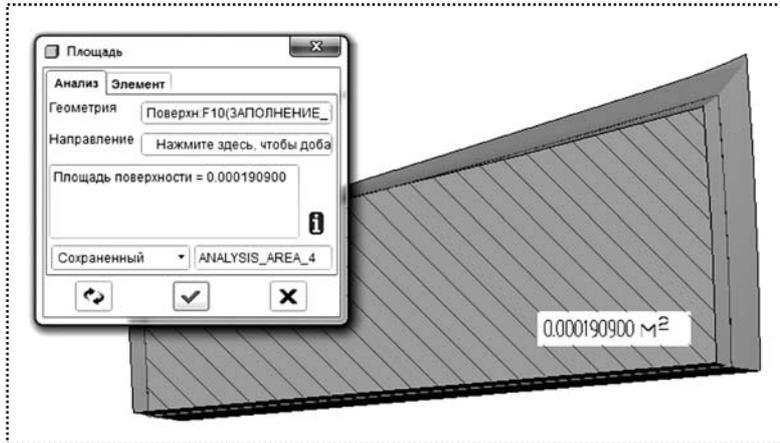


Рис. 6. Определение площади участка поверхности, отсеченного границей проходного сечения (заштрихованная область), с помощью стандартной команды

На заключительном этапе выполнения методики производят измерение площади участка поверхности, отсеченного кривой границы проходного сечения, путем выполнения стандартной команды используемого программного пакета. Эта процедура, даже повторяемая многократно вручную оператором, не требует больших затрат времени и имеет весьма незначительную вероятность возникновения ошибки или утраты результата, поскольку в процессе измерения все полученные значения фиксируются в текстовый лог-файл. Этот текстовый файл может быть впоследствии использован в качестве исходных данных для анализа распределения отклонений площадей проходных сечений отдельных межлопаточных каналов и дальнейшей оптимизации схемы их установки.

Время получения результирующего значения фактической площади проходного сечения соплового аппарата по базовой методике составляет 13...53 часа в зависимости от объема информации оцифровки и числа этапов получения полной оцифрованной модели. При этом непосредствен-

ное время расчета для одной пары лопаток составляет 20 мин [1]. Этот показатель не позволяет использовать ее с целью промежуточного контроля в процессе сборки при серийном производстве, даже с учетом существенного повышения точности по сравнению с традиционными способами измерения и расчета.

При совершенствовании методики по предложенным направлениям основной эффект сокращения времени будет достигнут в результате исключения этапов оцифровки отдельных лопаток и ручного восстановления параметрических кривых из границ проходного сечения на фасетной поверхности.

Вывод

В результате всестороннего анализа методики расчета фактической площади проходного сечения соплового аппарата (межлопаточных каналов лопаток) по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS II и программном обеспечении Geomagic Qualify были выявлены перспективные пути ее автоматизации с целью сокращения времени выполнения измерения и расчета, а также снижения результирующей погрешности. Для реализации некоторых из выбранных направлений автоматизации были созданы виртуальные модели межлопаточных каналов, на которых выполнялась проработка действий при расчете площади проходного сечения.

Библиографический список

1. **Расчет** фактической площади проходного сечения соплового аппарата (межлопаточных каналов лопаток) по данным оцифровки на измерительном комплексе ATOS II и программном обеспечении Geomagic Qualify. Методика № 554-20-1. М.: Авиадвигатель, 2011. 63 с.
2. **ATOS**. Руководство пользователя, ATOS V. 7. (2011) GOM mbH, Germany. Braunschweig. 2011. 263 с.



УДК 629.5.024.001

А.Я. Розинов, д-р техн. наук, **В.А. Шатилов**, канд. техн. наук (ОАО "ЦТСС"),
В.В. Логунов (НПП "Компенсатор")
 E-mail: mail@kompensator.ru

Оценка целесообразности изменения последовательности сборки и сварки монтажных соединений тонколистовых судовых конструкций

Представлен анализ трудоемкости постройки корпусов судов и кораблей, описана сущность и трудозатраты сборки и сварки монтажных соединений тонколистовых конструкций согласно традиционной и измененной технологий, приведены данные оценки остаточных сварочных напряжений при традиционной и измененной последовательности выполнения сборочно-сварочных работ. Даны сведения о работоспособности и прочности монтажных соединений тонколистовых конструкций при действии растягивающей и изгибающей циклической нагрузки. Указаны количественные показатели сокращения трудоемкости и непроизводительных трудозатрат, уменьшения материалоемкости и ресурсоемкости при изменении традиционной последовательности сборки и сварки монтажных соединений тонколистовых судовых конструкций.

The analysis of the labor intensity of construction of the hulls of ships is provided, the essence and the work of the assembly and welding joints assembly of thin-walled structures in accordance with traditional and new technologies is described, are estimates of the residual welding stresses in the traditional and modified the execution sequence of the assembly-welding works. The information about the health and strength of erection joints of thin-walled structures under the action of stretching and bending loads is given. Are quantitative indicators reducing complexity and unproductive labor costs, reduce material consumption and resource when you change the traditional sequence of assembly and welding of joints assembly of thin-walled vessel structures.

Ключевые слова: трудоемкость, процесс сборки, традиционная технология, непроизводительные трудозатраты, операция, измененная последовательность, остаточные сварочные напряжения, база сравнения, оценка прочности, работоспособность, продольное циклическое растяжение, поперечный циклический изгиб, монтажное соединение, материалоемкость, ресурсоемкость.

Keywords: complexity, process of Assembly, traditional technology, unproductive work, operation, modified sequence, residual welding voltage grid, reference base, the estimation of durability, performance, longitudinal circular stretching of cross cyclic bending, process connection, material consumption, resource intensity.

При постройке корпусов судов на стапеле технология процесса сборки монтажных соединений заключается в сведении кромок обшивки и концов балок подкрепляющего ее набора.

Анализ трудоемкости стапельной постройки корпусов судов свидетельствует о том, что трудозатраты процесса выполнения монтажных соединений этих корпусов в процентном соотношении распределяются следующим образом, %:

- сведение и выравнивание кромок обшивки, настилов, полотнищ и концов балок набора – 56...65;
- подрезка соединяемых кромок обшивки, настилов, полотнищ и концов балок набора – 5...13;
- скрепление собранных монтажных соединений на электроприхватках или гребенках – 8...13;
- зачистка поверхности монтажных соединений после завершения их сборки – 3...6;
- выполнение забойных монтажных соединений обшивки, настилов, полотнищ и концов балок набора из узлов и деталей россыпью – 4...27.

Приведенные данные свидетельствуют, что трудоемкость выполнения монтажных соединений корпусов судов и кораблей в целом определяется главным образом трудозатратами сведения и выравнивания кромок обшивки, настилов, полотнищ и концов балок набора. Соответственно традиционной технологии суммарная трудоемкость и продолжительность выполнения этой части процесса сборки характеризуется отдельным выполнением первоначального сведения и выравнивания кромок обшивки, настилов и полотнищ с закреплением их на электроприхватках и гребенках, а также последующим сведением и выравниванием концов балок набора, скрепляемых на электроприхватках.

Практическая реализация традиционной технологии сборки монтажных соединений связана с установкой и временной приваркой элементов крепления используемых средств сборки, а также удалением остатков швов временной сварки, устранением образовавшихся вырывов, прожогов и деформаций соединяемых судовых конструкций. Перечис-

ленное является основной причиной непроизводительных трудозатрат процесса выполнения монтажных соединений и в особой мере проявляется при сборке и сварке таких соединений тонколистовых конструкций.

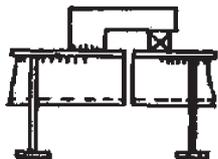
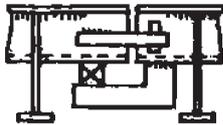
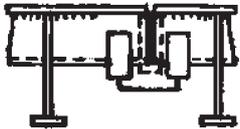
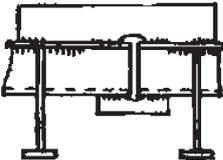
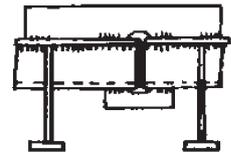
С целью сокращения непроизводительных трудозатрат при выполнении указанных монтажных соединений предложена измененная технология сведения и выравнивания кромок обшивки, настилов, полотнищ и концов балок набора. Эта технология предусматривает первоначальное соединение и скрепление на электроприхватках каждого из концов балок набора с той частью обшивки, настилов и полотнищ, которые подкрепляют эти балки. В результате выполнение монтажных соединений обеспечивается путем выравнивания по высоте балок набора с одновременным сведением кромок соединяемой обшивки, настилов и полотнищ. Тем самым сокращается число операций процесса выполнения монтажных соединений (табл. 1).

При использовании данной технологии существенно сокращается число временно привариваемых элементов крепления используемых средств сборки, что приводит к уменьшению непроизводительных трудозатрат. Путем проведения наблюдений, их анализа и построения на этой базе циклограмм сборки монтажных соединений реальных тонколистовых конструкций установлено, что за счет изменения последовательности операций процесса сборки и тем самым сокращения непроизводительных трудозатрат, суммарная трудоемкость сборки монтажных соединений уменьшается в среднем на 25 %.

Естественно считать, что реализация стремления сократить объем непроизводительных трудозатрат в процессе выполнения монтажных соединений строящихся на стапеле корпусов судов, связанном с изменением порядка проведения сборки и сварки, может вызвать существенное изменение напряженного состояния монтажных соединений.

Таблица 1

Сокращение числа монтажных операций в ходе процесса с измененной последовательностью по сравнению с традиционным процессом

Традиционный процесс			Процесс с измененной последовательностью выполнения сборочно-сварочных операций		
1	Сборка стыка кромок обшивки, настилов полотнищ		1	Сборка концов балок набора и кромок обшивки, настилов, полотнищ, затем совмещение концов балок набора вместе с кромками обшивки, настилов, полотнищ	
2	Сборка стыков концов балок набора		2	Сварка стыков кромок обшивки, настилов, полотнищ и концов балок набора	
3	Установка ребер жесткости		—	—	—
4	Сварка стыков кромок обшивки настилов, полотнищ и концов балок набора		—	—	—

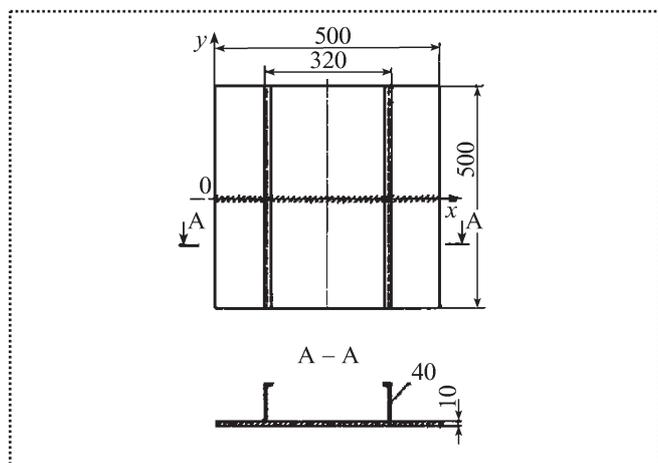
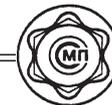


Рис. 1. Схема модели секции

С целью определения характеристики напряженного состояния монтажных соединений, выполняемых путем измененной технологии сборочно-сварочных работ, проведены сопоставительные экспериментальные исследования. В процессе этих исследований выполнено экспериментальное сравнение напряженного состояния монтажных соединений, сборка и сварка которых осуществлены по традиционной и измененной технологии.

Для сравнительной оценки напряженного состояния, возникающего при различной последовательности выполнения сборочно-сварочных работ, разработали и изготовили модель секции, схема которой представлена на рис. 1.

Материал модели секции – низколегированная сталь. Все сварные швы выполнены в следующем режиме: сила тока – 180 А, напряжение – 24 В, скорость сварки – 25 м/ч.

В процессе осуществления сравнительной оценки напряженного состояния с использованием модели секции, представленной на рис. 1, напряженное состояние ее балок и полотнища исследовали раздельно.

Сравнительную оценку распределения напряжений выполняли на основе данных сборочно-сварочных работ, осуществленных при традиционной (А) и измененной (В) последовательности операций процесса сварки. При этом в состав исследуемых включили процесс сборки и сварки (С), отличающийся ужесточением условий его выполнения.

Технологический процесс А включал:

- приварку балки к полотну (участок 100 мм остается свободным);
- сборку стыка полотна;
- сварку стыка полотна;
- сборку стыка балки;

- сварку стыка балки;
- окончательную приварку балки к полотну.

Технологический процесс В включал:

- приварку балки к полотну (участок 100 мм остается свободным);
- сборку стыка балки;
- сварку стыка балки;
- сборку стыка полотна;
- сварку стыка полотна;
- окончательную приварку балки к полотну.

Технологический процесс С включал:

- приварку балки по всей длине к полотну;
- сборку стыка балки;
- сварку стыка балки;
- сборку стыка полотна;
- сварку стыка полотна.

В соответствии с указанным определили показатели напряженного состояния в соединяемых сваркой полотне обшивки и балках набора, а также распределения поперечных и продольных остаточных сварочных напряжений при всех рассмотренных вариантах последовательности выполнения сборки и сварки стыков полотен и балок набора. Закономерности этого распределения представлены на рис. 2–5.

С учетом принятого за базу сравнения традиционного варианта технологического процесса А, произвели оценку напряженного состояния в полотнах листов обшивки и балках набора по максимальным значениям напряжений в сварных соединениях.

Анализ поперечных напряжений в полотнах листов показал, что в случае полностью приваренных балок к обшивке напряжения в листе на 5 % больше, чем при традиционном процессе сборки и сварки монтажных соединений. В другом случае, при неприваренном участке балки к обшивке напряжения в листе на 60 % меньше по сравнению с напряжениями, возникающими при традиционном варианте сборки и сварки монтажного соединения.

Полученные результаты позволили считать, что увеличение напряжений в первом случае объясняется отсутствием неприваренного участка балки набора, характерного для традиционной технологии. Уменьшение поперечных напряжений во втором случае объясняется выполнением сварки неприваренного участка балки, благодаря чему происходит перераспределение напряжений в сварном шве, стенке балки и листе. Максимальные продольные напряжения в листах распределяются

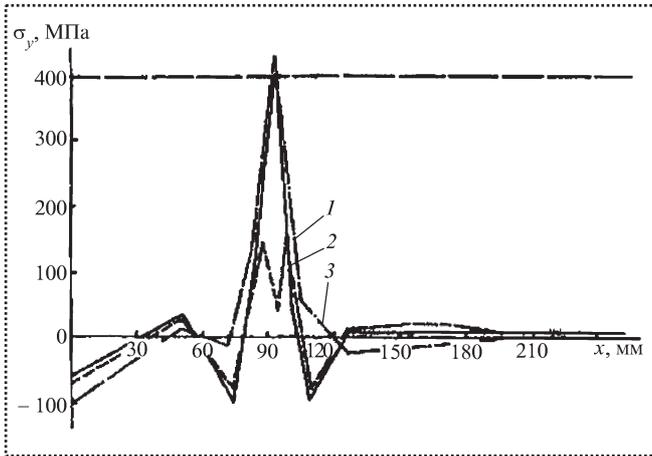


Рис. 2. Распределение поперечных остаточных сварочных напряжений в полотно листов:

1 – после сварки стыка листов, стыка балок неприваренного участка балок; 2 – после сварки стыка балок, стыка листов неприваренного участка балок; 3 – после сварки стыка балок, стыка листов

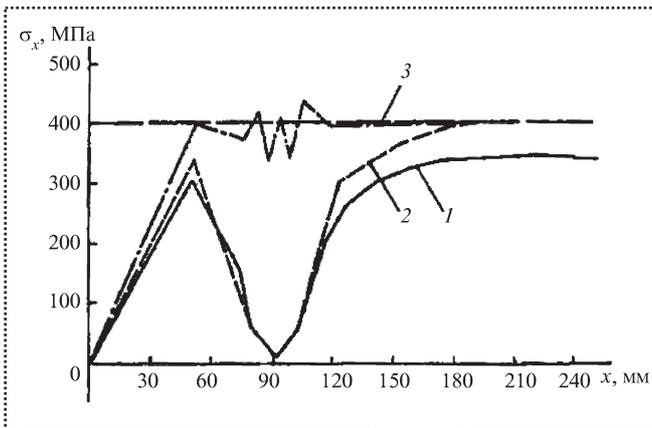


Рис. 3. Распределение продольных остаточных сварочных напряжений в полотно листов:

1 – после сварки стыка листов, стыка балок неприваренного участка балок; 2 – после сварки стыка балок, стыка листов неприваренного участка балок; 3 – после сварки стыка балок, стыка листов

примерно одинаково при всех вариантах сборки и сварки и равняются пределу текучести материала.

Результаты определения поперечных напряжений, возникающих в стенке балки, показали, что при традиционном варианте последовательности выполнения сборки и сварки практически по всей высоте стенки балки действуют напряжения растяжения, а при двух других вариантах с измененной последовательностью сборки и сварки, стенка балки сжата, причем в основании балки напряжения сжатия могут достигать предела текучести. Продольные напряжения в стенке балки получают значения растяжения, близкие к пределу текучести во

всех трех вариантах рассмотренной последовательности сборки и сварки.

С учетом указанного установлено, что в общем максимальные напряжения, возникающие в районе монтажного стыка при изменении последовательности сборки и сварки, незначительно отличаются по величине от напряжений, возникающих

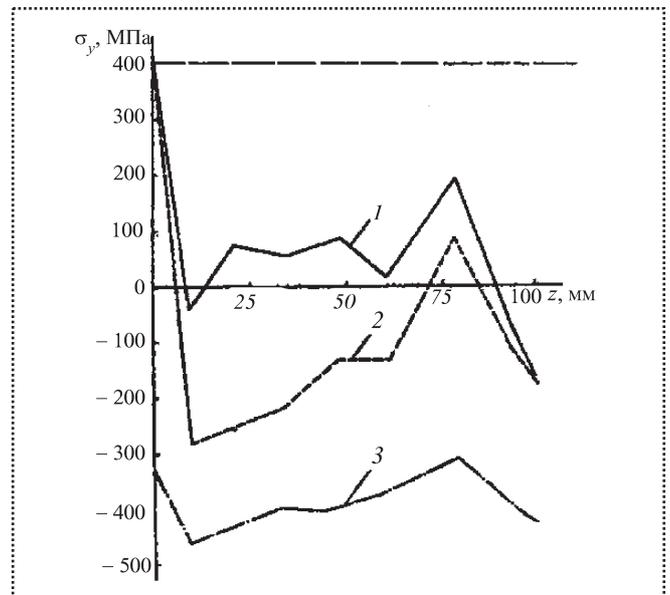


Рис. 4. Распределение поперечных остаточных сварочных напряжений в балке набора:

1 – после сварки стыка листов, стыка балок неприваренного участка балок; 2 – после сварки стыка балок, стыка листов неприваренного участка балок; 3 – после сварки стыка балок, стыка листов

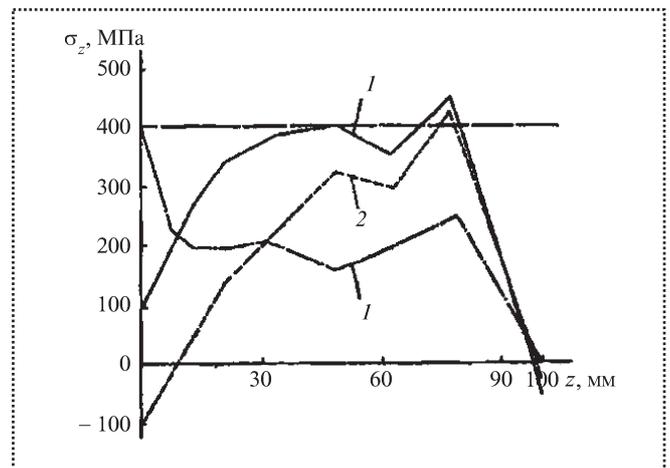


Рис. 5. Распределение продольных остаточных сварочных напряжений в балке набора:

1 – после сварки стыка листов, стыка балок неприваренного участка балок; 2 – после сварки стыка балок, стыка листов неприваренного участка балок; 3 – после сварки стыка балок, стыка листов

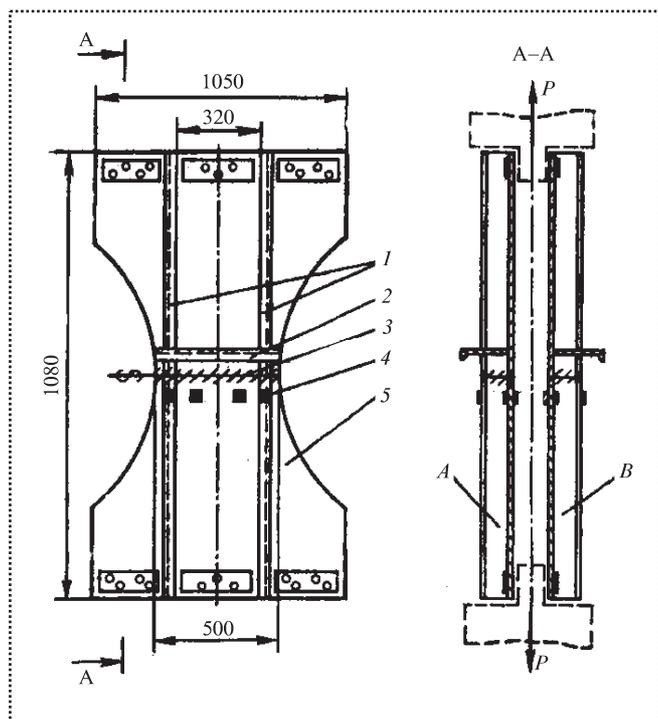


Рис. 6. Образец для испытаний на продольное циклическое растяжение:

1 – балки набора, полосоульб 8 или 10; 2 – ребро жесткости, полосоульб 16; 3 – монтажный стык; 4 – тензодатчики; 5 – лист обшивки; A, B – образцы с монтажным соединением, выполненные соответственно по традиционному и новому технологическим процессам

при традиционном процессе проведения сборочно-сварочных работ.

В целях представления полной картины влияния технологически необходимого изменения последовательности выполнения сборочных и сварочных работ при формировании монтажных соединений корпусов судов и кораблей на стапеле, проведена сравнительная оценка прочности этих соединений, выполненных по традиционной и измененной технологии. Такая оценка выполнена путем экспериментальных исследований усталостной прочности натуральных образцов монтажных соединений на продольное циклическое растяжение и поперечный циклический изгиб.

Для проведения указанных испытаний были изготовлены образцы, имитирующие в натуральный размер монтажные соединения тонколистовых судокорпусных конструкций, выполненные по традиционной технологии и технологии, предусматривающей измененную последовательность сборочно-сварочных работ (рис. 6 и 7).

Испытание образцов на продольное циклическое растяжение осуществляли попарно. Испыта-

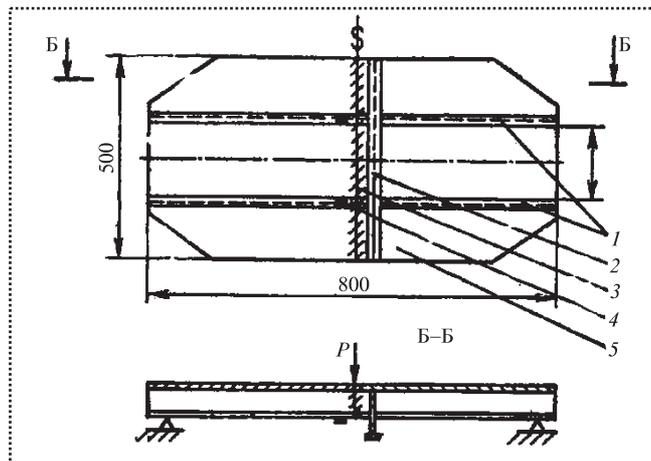


Рис. 7. Образец для испытаний на поперечный циклический изгиб:

1 – балки набора, полосоульб 8 или 10; 2 – ребро жесткости, полосоульб 16; 3 – монтажный стык; 4 – тензодатчики; 5 – лист обшивки

ния начинали со ступенчатого статистического нагружения с последующей ступенчатой разгрузкой. Проверку идентичности нагружения обоих образцов проводили тензометрированием балок набора и листов обшивки. Для этого использовали провололочные тензорезисторы, а регистрацию замеров осуществляли с помощью измерительного моста.

Результаты замеров напряжений и их анализ показали линейность характеристик тензорезисторов и удовлетворительную равномерность распределения напряжений по поперечному сечению каждого образца, а также достаточно хорошее совпадение показаний симметричных датчиков в каждой паре испытываемых образцов.

При испытаниях образцы подвергали циклическому нагружению с частотой 60 циклов/мин, что в 5–6 раз превышает частоту основной переменной составляющей эксплуатационных нагрузок натуральных конструкций, обусловленной действием волновых изгибающих моментов.

Данные измерений напряжений при продольном циклическом растяжении подтвердили достаточно близкий характер разрушений соединений листов и балок подкрепляющего набора, выполненных по традиционной технологии и технологии с изменением последовательности сборочно-сварочных операций. Испытания на поперечный циклический изгиб показали, что возникающие усталостные трещины при испытаниях образцов, изготовленных по традиционной технологии и технологии с измененным порядком, зарождались в околошовной зоне сварных стыков подкрепляющего



набора. Это являлось в дальнейшем основной причиной разрушения испытываемых образцов.

Таким образом, было подтверждено, что работоспособность монтажных соединений тонколистовых конструкций, выполненных по традиционной технологии и технологии с измененной последовательностью выполнения сборочно-сварочных работ аналогична.

Проведенным расчетом технико-экономической эффективности сокращения непроизводительных трудозатрат путем изменения последовательности выполнения сборочных и сварочных операций при формировании монтажных соединений тонколистовых судовых конструкций установлено, что наряду с 25%-ным сокращением общей трудоемкости,

снижение непроизводительных трудозатрат при сборке соединений обшивки составляет до 35 % и набора – на 52 %. При этом материалоемкость процесса сборки монтажных соединений уменьшается в 2,8 раза, а ресурсоемкость – в 2,3 раза.

Библиографический список

1. Логунов В.В. Техничко-экономическая эффективность сокращения непроизводительных трудозатрат процесса сборки монтажных соединений тонколистовых судовых корпусных конструкций // Судостроение. 2011. № 2. С. 49–51.

2. Розинов А.Я., Шатилов В.А., Логунов В.В. Технология и средства выполнения процесса сборки монтажных соединений тонколистовых конструкций с существенным сокращением числа временно привариваемых крепежных и фиксирующих элементов // Вестник технологии судостроения и ремонта. 2010. № 8. С. 96–98.

УДК 621.717

М.Н. Сорокин, И.И. Колтунов, д-ра техн. наук, **Д.А. Сазонов, Д.И. Урманова** (Московский государственный машиностроительный университет)
E-mail: sorokin-mn@mail.ru

Математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник"

Дана математическая постановка задачи комплектования как задачи Монжа–Канторовича при селективной сборке изделий по методу межгрупповой взаимозаменяемости, в процессе которой реализуются решения уравнений четырехзвенной размерной цепи.

A mathematical formulation of the matching problem as a "Monzh–Kantorovich problem" of the selective assembly of products by the method of inter-group interchangeability is given, during which solutions of 4-link dimensional chain equations are realized.

Ключевые слова: селективная сборка, задача комплектования, задача Монжа–Канторовича, метод межгрупповой взаимозаменяемости.

Keywords: selective assembling, matching problem, problem of Monzh–Kantorovich, method of intergroup interchangeability.

Под изделием типа "подшипник" будем понимать изделие, параметр сопряжения которого зависит от трех сопрягаемых параметров [1]. Селектив-

ная сборка изделий типа "подшипник" может осуществляться как по методу групповой взаимозаменяемости, так и по методу межгрупповой взаимозаменяемости [2, 3].

Основные задачи при реализации селективной сборки изделий типа "подшипник" – обеспечение полной собираемости изделий и отсутствие блокировки работы сборочного автомата. Эти задачи можно решить, если известна математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" и найден эффективный метод ее решения.

Постановка и решение этой задачи определяют эффективность применения селективной сборки изделий типа "подшипник" и поэтому являются важной научной проблемой. Селективная сборка изделий – востребованная технологическая операция, так как она позволяет увеличить точность параметра сопряжения в 5–10 раз по сравнению со сборкой по методу полной взаимозаменяемости.

В данной работе дана математическая постановка задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" по методу межгрупповой взаимозаменяемости.

Введем необходимые обозначения:

x_i – сопрягаемый параметр, $i = \overline{1, 3}$. В дальнейшем индекс i всегда будет принимать эти три значения;

δx_i – поле допуска сопрягаемого параметра x_i , $\delta x_i = [-1, +1]$. Значения сопрягаемых параметров рассматриваем в нормированной системе полей допусков;

δ – длина селективного интервала поля допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i ;

M – число селективных интервалов поля допуска δx_i , $M = \frac{2}{\delta}$;

x_{ij_i} – значения сопрягаемого параметра x_i в точках деления поля допуска δx_i сопрягаемого параметра x_i на селективные интервалы δ , $j_i = \overline{0, M}$. Индекс j_i определяет также номер селективного интервала (группы), $j_i = \overline{1, M}$;

R – параметр сопряжения. Рассматриваем линейную связь параметра сопряжения с сопрягаемыми параметрами, $R = x_1 + x_2 + x_3$;

δR – поле допуска параметра сопряжения R , $\delta R = [R_{\min}, R_{\max}]$, где R_{\min} и R_{\max} – минимальное и максимальное требуемые значения параметра сопряжения R ;

ξ_i – случайная величина, принимающая значения сопрягаемого параметра x_i ;

$f_i(x_i)$ – функция распределения плотности вероятностей случайной величины ξ_i ;

p_{ij_i} – относительное число деталей в j -й селективной группе i -й детали,

$$p_{ij_i} = \int_{x_{ij_{i-1}}}^{x_{ij_i}} f_i(x_i) dx_i.$$

Селективная сборка изделий чаще всего реализуется как периодическая селективная сборка. Детали для сборки поступают партиями. Сопрягаемые параметры деталей измеряют, детали сортируют на селективные группы. Затем для партии деталей решают задачу комплектования, т.е. задачу получения сборочных комплектов, и происходит сборка изделий.

Для получения сборочного комплекта детали выбирают (рис. 1) из тех селективных групп (j_1, j_2, j_3), для которых совокупность сопрягаемых

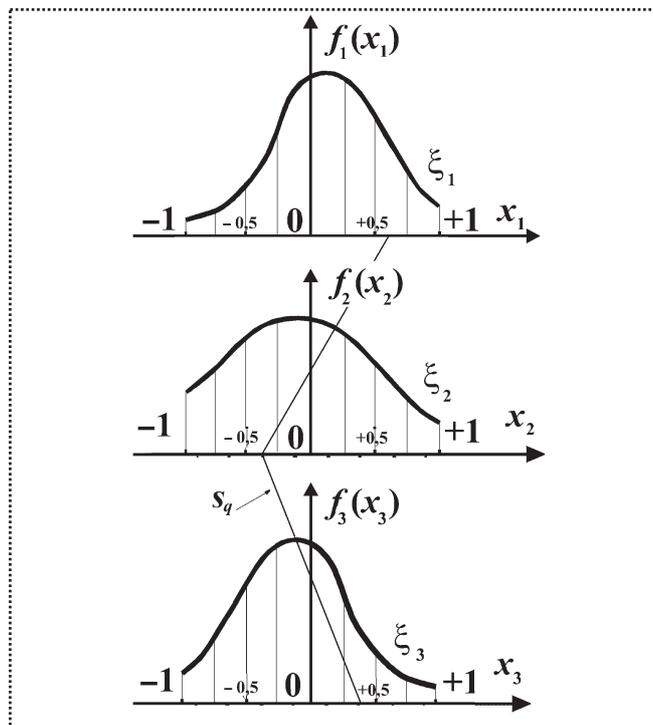


Рис. 1. Схема комплектования деталей

параметров x_i удовлетворяет требуемому условию на параметр сопряжения R , т.е.

$$R_{\min} \leq x_1 + x_2 + x_3 \leq R_{\max}. \quad (1)$$

Так как детали выбирают из селективных групп с индексами j_i , то совокупность индексов (j_1, j_2, j_3) определяет вариант получения сборочного комплекта или путь комплектования. Если для пути комплектования выполняется условие (1), то такой путь комплектования называется **допустимым**.

Введем дополнительные обозначения:

s_q – произвольный путь комплектования, $q = \overline{1, N}$, где N – общее число произвольных путей комплектования;

S – множество произвольных путей комплектования, $s_q \in S$;

\bar{s}_q – допустимый путь комплектования, $q = \overline{1, \bar{N}}$, где \bar{N} – общее число допустимых путей комплектования;

\bar{S} – множество допустимых путей комплектования, $\bar{s}_q \in \bar{S}$.

Сформулируем задачу комплектования для селективной сборки изделий типа "подшипник" следующим образом:



для данных партий деталей найти такие допустимые пути комплектования \bar{s}_q и выбрать на них такое число сборочных комплектов \bar{p}_q , чтобы общее число сборочных комплектов p было бы максимальным.

Задача комплектования будет непрерывной, если $\delta = 0$, и дискретной, если $\delta \neq 0$.

Если $\delta = 0$, то задача комплектования является задачей Монжа–Канторовича с индикаторной функцией стоимости.

Дано:

- функции распределения плотности вероятностей $f_i(x_i)$ случайных величин ξ_i , определенных на множестве X_i , $X_i = [-1, +1]$;
- множества: \bar{X} , $\bar{X} \subset X$, $X = X_1 X_2 X_3$.

Найти:

- функцию распределения плотности вероятностей $f(x_1, x_2, x_3)$ случайной величины $\xi = (\xi_1, \xi_2, \xi_3)$, определенную на множестве X с маргинальными функциями распределения плотности вероятностей:

$$f(x_1, 1, 1) = f_1(x_1);$$

$$f(1, x_2, 1) = f_2(x_2);$$

$$f(1, 1, x_3) = f_3(x_3),$$

и для которой

$$\int_{\bar{X}} c(x_1, x_2, x_3) f(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3 \rightarrow \max,$$

где

$$c(x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} 1, & (x_1, x_2, x_3) \in \bar{X}, \\ 0, & (x_1, x_2, x_3) \notin \bar{X}; \end{cases}$$

- индикаторная функция стоимости.

Множество \bar{X} определяется из выражения (1).

Максимальное значение собираемости изделий определится как

$$P = \int_{\bar{X}} f(x_1, x_2, x_3) dx_1 dx_2 dx_3.$$

Дискретная задача комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" может быть представлена как задача линейного программирования:

среди неотрицательных \bar{p}_q , $q = \overline{1, N}$, удовлетворяющих условию

$$\sum_{s_q \in S_{ij_i}} \bar{p}_q \leq p_{ij_i}, \quad j_i = \overline{1, M},$$

определить такие, на которых достигается максимум линейной формы

$$\sum_{s_q \in S} \bar{p}_q \rightarrow \max,$$

где S_{j_i} – множество допустимых путей комплектования, проходящих через j_i -й селективный интервал i -й детали.

Пусть совокупность допустимых путей комплектования и числа полученных на них сборочных комплектов $\{\hat{s}_q, \hat{p}_q\}$ определяет решение задачи комплектования как задачи линейного программирования. Тогда максимальное число сборочных комплектов можно определить как

$$P = \sum_{\hat{s}_q \in \hat{S}} \hat{p}_q,$$

где \hat{S} – общее число допустимых путей комплектования, определяющих решение задачи линейного программирования.

Задача комплектования может быть представлена также как транспортная задача, как задача определения максимального потока в транспортной сети комплектования.

Транспортную сеть комплектования представим в виде трехдольного ориентированного графа с вершинами, которым соответствуют селективные группы деталей. Эти вершины обозначим P_{ij_i} . Так как вершины P_{ij_i} содержат определенное относительное число деталей p_{ij_i} , то для построения транспортной сети комплектования необходимо вершины графа P_{ij_i} раздвоить, получить вершины $P_{ij_i}^1$ и $P_{ij_i}^2$, соединить их ребром с пропускной способностью, равной p_{ij_i} , т.е. $\rho(P_{ij_i}^1, P_{ij_i}^2) = p_{ij_i}$.

Тогда транспортная сеть комплектования примет вид, представленный на рис. 2, где s и t – исток и сток транспортной сети.

Пропускные способности ребер следующие:

$$\rho(P_{ij_i}^1, P_{ij_i}^2) = p_{ij_i}, \rho(s, P_{ij_i}^1) = \rho(P_{ij_i}^2, t),$$

$$P_{2j_2}^1) = \rho(P_{2j_2}^2, P_{3j_3}^1) = \rho(P_{3j_3}^2, t) = \infty.$$

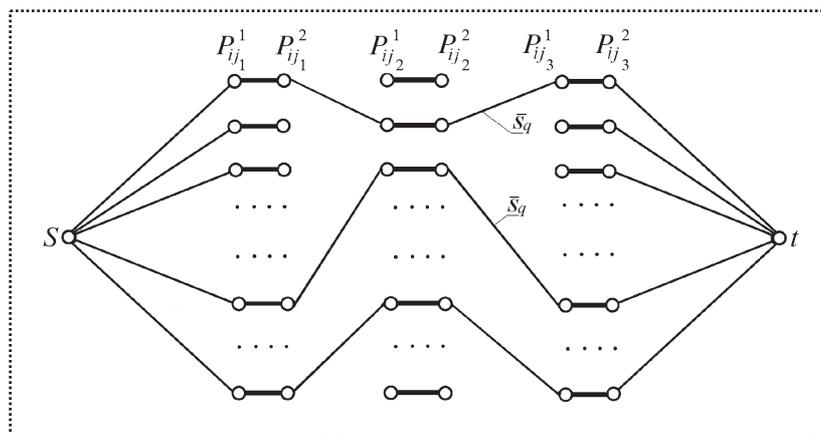


Рис. 2. Транспортная сеть комплектования

Тогда задача комплектования как транспортная задача на сети комплектования может быть сформулирована следующим образом:

найти максимальный поток в транспортной сети комплектования

$$\sum_{s_q \in S} p_q \rightarrow \max,$$

при условии, что

$$\sum_{s_q \in S_{ij_i}} \bar{p}_q \leq p_{ij_i}.$$

Для решения дискретной задачи комплектования можно применять стандартные методы решения задачи целочисленного линейного программирования и потоковых задач на сетях.

Однако, учитывая на практике большую размерность задач комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник", применение стандартных методов неэффективно и не всегда дает точное решение.

Поэтому необходима разработка эвристических методов решения задач подобного типа, которые если и не являются точными, но которые при определенных условиях и ограничениях давали бы точное решение задачи комплектования.

Приведенная математическая постановка задачи комплектования и решение этой задачи позво-

ляют использовать всю информацию о деталях, поступивших для комплектования, и получить максимальную собираемость изделий. В сборочных автоматах, которые имеются в производстве для сборки подшипников, используется не вся информация о деталях в партии, получение сборочных комплектов осуществляется на базе методов решения задач комплектования изделий типа "вал-втулка", что часто приводит к блокированию работы автомата, снижению эффективности его работы.

Таким образом, математическая постановка задачи комплектования, разработка методов решения этой задачи позволяют создать высокоэффективную технологию селективной сборки изделий типа "подшипник", обеспечивающую полную собираемость изделий и отсутствие блокировки работы автомата.

Выводы

1. Дана математическая постановка задачи комплектования изделий типа "подшипник" как задачи Монжа–Канторовича с индикаторной функцией стоимости.

2. Показано, что разработка простых методов решения задачи комплектования является необходимым условием создания эффективных технологий селективной сборки изделий типа "подшипник" по методу межгрупповой взаимозаменяемости.

Библиографический список

1. Бонч-Осмоловский М.А. Селективная сборка. М.: Машиностроение, 1974. 142 с.
2. Сорокин М.Н. Задача комплектования при сборке изделий типа "вал-втулка". Прогрессивная технология приборостроения: межвуз. сб. научн. тр. М.: ВЗМИ, 1980. С. 157–163.
3. Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н. Формализация метода межгрупповой взаимозаменяемости при реализации селективной сборки изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 8. С. 74–82.

УДК 621.9.047

А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, д-р техн. наук, А.А. Клименченков

(Воронежский государственный технический университет)

E-mail: vsmolen@inbox.ru

Нанесение информации растровым инструментом на детали с эластичным диэлектрическим покрытием

Рассмотрено электрохимическое нанесение информации на детали без последующего нарушения слоя вязкого диэлектрического слоя с использованием универсального электрода-инструмента в форме растра, имеющего отдельные элементы, подключение которых к источнику тока выполняется программным механизмом и позволяет с помощью единого инструмента получать любые информационные блоки на металлических деталях, в том числе после обработки.

Electrochemical marking of information on details without following failure of the adhesive dielectric layer with use of the universal tool electrodes in form of raster, that have individual elements, is viewed. The connection of these elements to current source is realizing by programming mechanism and allows to receive any information blocks on metallic details, including after machining, by using single instrument.

Ключевые слова: металлический материал, эластичное покрытие, электрохимическое маркирование, растровый инструмент.

Keywords: metallic material, elastic coating, electrochemical marking, raster-type instrument.

Большинство деталей, применяемых в машиностроении, имеют защитные покрытия в виде поверхностных слоев из неметаллических эластичных материалов, таких как лаки, краски, резина и др. Покрытия предохраняют изделия после сборки в процессе эксплуатации от попадания загрязнений, влаги, агрессивных сред, вызывающих коррозию, защищают от воздействия электрических и магнитных полей, нарушающих работу приборов. Под покрытиями находится поверхность детали с различной информацией, доступ к которой возможен только после частичного удаления поверхностного слоя, что может негативно влиять на надежность изделий и обязательно требует восстановления

сплошности покрытия перед началом эксплуатации (например, после контроля состояния детали после нормированной наработки изделия).

Попытки нанесения информационных знаков на поверхности с диэлектрическими покрытиями [1] вызывали локальное нарушение защитного слоя, а нанесение на него последующих защитных материалов (как правило, в сборных узлах) требовало значительных дополнительных трудозатрат, что затрудняло эксплуатацию изделий.

Большинство диэлектрических покрытий, наносимых, как правило, после обработки узлов, эластичны и способны при малой толщине полностью перекрывать отверстия малого сечения после удаления проникающего инструмента, в частности, высоконапорной струи жидкости. Если толщина покрытия значительная (по данным работы [1] – более 0,3 мм), то требуется его прокалывание, например, металлической иглой [2] с формой заточки, не вызывающей разрезания покрытия.

Современные средства управления процессами электрохимической размерной обработки позволяют по командам с пульта формировать различные электрические поля на едином электроде-инструменте, состоящем из отдельных изолированных друг от друга элементов (например, трубок малого сечения) в форме растра. Такой универсальный инструмент дает возможность наносить переменную информацию, что представляет интерес для современного гибкоструктурного производства, где сведения об изделиях часто изменяются и требуется их периодическое уточнение.

Схема растрового маркирования металлических деталей с эластичным диэлектрическим покрытием приведена на рис. 1.

Элементы 1–4, как правило, соединены в растр из стержней или трубок, изолированных друг от друга слоем 5. От командоаппарата к элементам, находящимся на контуре наносимых знаков, подводится ток от источника питания и рабочая среда б

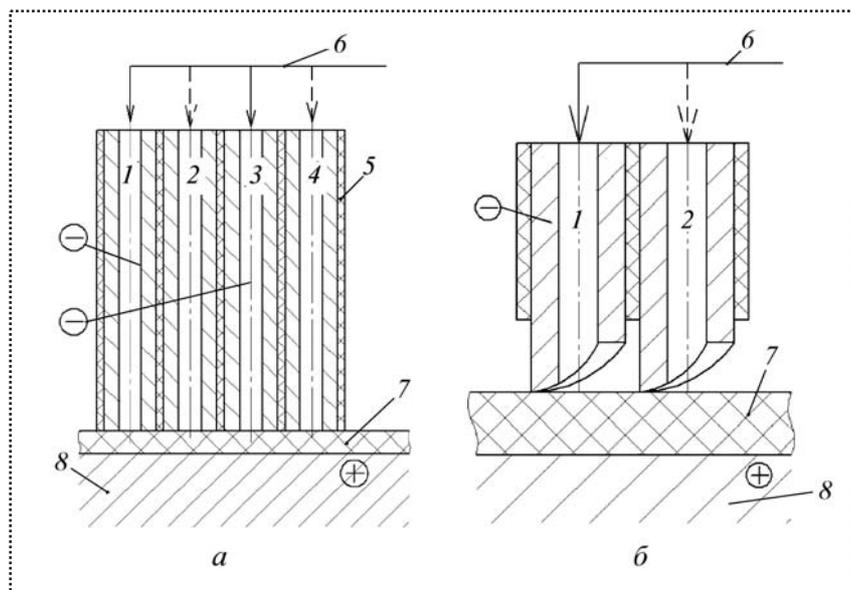


Рис. 1. Схема электрохимического маркирования деталей с диэлектрическим покрытием:

a – тонкое покрытие; *б* – покрытие со значительной толщиной; 1–4 – элементы растрового электрода-инструмента; 5 – изоляция элементов; 6 – подвод к элементам жидкой среды; 7 – диэлектрическое покрытие детали; 8 – металлическая деталь

под высоким давлением. Если толщина диэлектрического эластичного покрытия 7 на детали 8 не велика (для большинства покрытий не более 0,3 мм), то инструментом, прокалывающим покрытие 7, является струя жидкости под высоким давлением, поступающая по программе от системы 6 внутрь элементов 1–4 (рис. 1, *a*). Если толщина покрытий значительная (может достигать десятков и сотен миллиметров), то получить отверстия струей жидкости не всегда удается и приходится использовать колющий инструмент (рис. 1, *б*), например в виде подвижных вдоль оси металлических игл со специальной заточкой, прокалывание которыми слоя диэлектрика 7 позволяет ввести в пространство между слоем и деталью необходимое количество жидкой рабочей среды на базе, как правило, нейтральных солей, с добавками, обеспечивающими контрастность изображения. В последнем случае количество добавляемой жидкости должно обеспечить отрыв покрытия и заполнение зоны нанесения информации рабочей средой. После впрыска жидкости элементы отводят до прекращения металлического контакта между ними и деталью, после чего подают на подключенные элементы (на рис. 1, *б* показано два элемента) ток (постоянный или импульсный) на время, необходимое для нанесения информации.

Излишек рабочей среды удаляется из зоны обработки через элементы, прокалывающие покрытие.

Элементы с отверстиями выполняют из стандартных трубок и для их подбора требуется обосновать необходимые диаметры наружной и внутренней поверхности.

Наружный диаметр не должен превышать ширины линии контура знака, а внутренний – обеспечивать формирование струи (для тонкого покрытия – рис. 1, *a*), создающей канал без разрыва эластичных покрытий, характеристики которых приведены в табл. 1.

Процесс анодного растворения контура знака протекает в период вскрытия отверстия и далее за счет индукционных токов при импульсном униполярном напряжении на электродах.

На рис. 2 приведен фрагмент электрода-инструмента с двумя элементами растрового контура знака шрифта

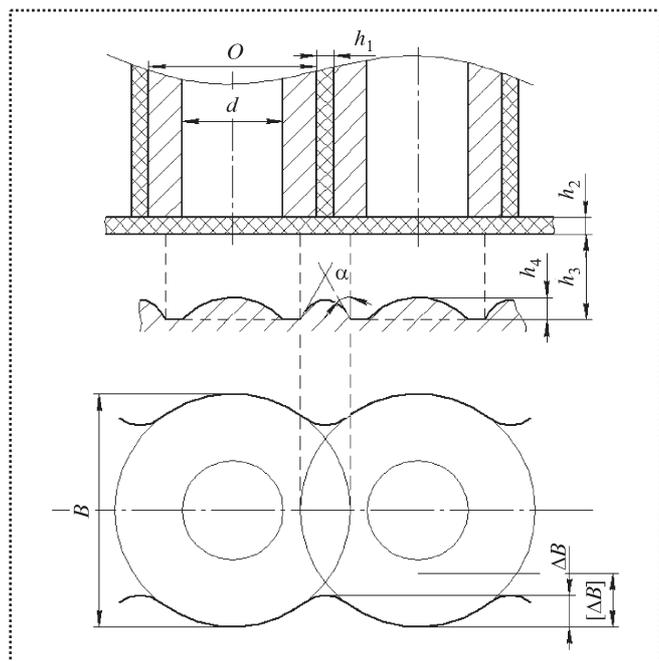
№ 5, получаемого под слоем эластичного покрытия.

Для элементов использованы стандартные латунные трубки с наружным диаметром $D = 0,5$ мм, что совпадает со стандартной шириной линии обвода для знаков шрифта № 5 (0,1 высоты знака). Трубки снаружи изолированы покрытием толщиной $h_1 = 0,05$ мм, внутреннее отверстие трубок имеет диаметр $d = 0,3$ мм. Поверхность детали покрыта эластичным лаком с большим относительным удлинением и высокой адгезией к металлам. Толщина покрытия детали $h_1 = 0,05$ мм.

Режимы нанесения информации: напряжение на электродах 12 В, ток пульсирующий с частотой 50 Гц, время обработки 2,5 с, давление рабочей среды 200 ± 10 МПа, объем подаваемой жидкости 0,5 мл. Состав рабочей среды – 15%-ный раствор нитрата натрия. Глубина знака $h_3 = 0,03$ мм. Донная часть знака имеет неровности с h_4 до 0,01 мм в форме выступов под диэлектрическим покрытием элементов и под отверстиями в трубках. За счет рассеивания электрического поля границы выступов имеют уклоны $\alpha = 3,5^\circ$, что позволяет получить сплошной контур знаков за счет накопления над одной частью контрастных продуктов обработки после серии импульсов тока.

Свойства эластичных покрытий, наносимых на металлы

Материал покрытия	Плотность материала, г/см ³	Толщина покрытия		Механические свойства		
		Технологически осуществимая (минимальная)	Предельно возможная для маркирования	Прочность при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %	Адгезия (прочность сцепления), МПа
Резина	1	0,05	0,3	1,49...2,00	12...15	1,5...1,8
Каучук	1,0...1,6	0,05	0,3	1,2...3,0	6...16	1,5...2,0
Полиуретан	1,2	0,2	0,2	10...12	4...6	1,8...2,0
Эмали типа ЭП	0,92	0,02	0,2	9...14	1,1...1,2	10...12
Клеи, лаки	0,9	0,02	0,3	3,4...3,9	4...16	8...10
Грунтовка	1,4	0,05	0,3	2,9...3,4	4...6	10...13
Желатин (фотохимическое покрытие)	1,3	0,05	0,1 (технологически достижимая толщина)	1,2...1,5	6...10	5...6


Рис. 2. Контур штриха, полученный на стальной детали под слоем покрытия лаком (шрифт № 5):

угол уклона боковой поверхности знака $\alpha = 3,5^\circ$; наружный диаметр элемента раstra $D = 0,5$ мм; отверстие в элементе $d = 0,3$ мм; толщина покрытия трубок $h_1 = 0,05$ мм; толщина диэлектрического покрытия детали $h_2 = 0,06$ мм; глубина знака $h_3 = 0,03$ мм; высота неровностей в донной части знака $h_4 = 0,01$ мм (не регламентируется); ширина линии контура знака $B = 0,55$ мм; изменение ширины линии $\Delta B = 0,08$ мм; допустимое изменение ширины линии $[\Delta B] = 0,12$ мм

При достаточно тонком слое покрытия трубок расстояние между соседними элементами перекрывается электрическим полем и формируется сплошной контур знака (выделен на нижней части рис. 2). Полученная ширина штриха ($B = 0,55$ мм) при допуске на ширину $[\Delta B] = 0,1$ мм и установленной погрешности $\Delta B = 0,8$ мм отвечает стандартам на шрифты. За счет уклона боковых поверхностей углублений (угол α на рис. 2) границы знаков изменяются в пределах $2\Delta B$, но наличие на поверхности углубления темного осадка (продуктов обработки) позволяет создать контрастные информационные массивы, отвечающие требованиям читаемости.

Толщина осадка, определяющая количество наносимой информации, зависит от глубины знака h_3 , угла α , свойств и толщины h_2 , эластичного покрытия, а также режимов маркирования – напряжения на электродах (рис. 3) и времени выполнения операции.

При повышении толщины диэлектрического покрытия увеличивается межэлектродный зазор, возрастают потери напряжения, поэтому требуется повысить напряжение на электродах, что вызывает снижение четкости границ знаков. Экспериментальные исследования показали, что для большинства покрытий толщину слоя желательно ограничивать в пределах 0,3 мм (см. табл. 1).

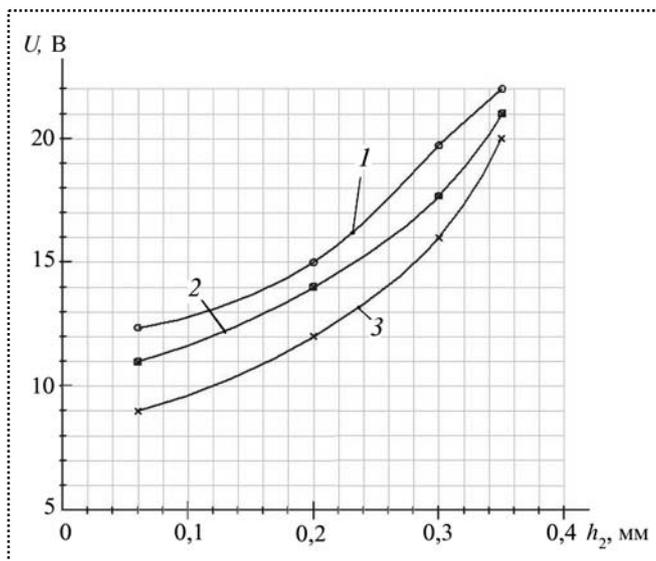


Рис. 3. Выбор напряжения U на электродах при различной толщине h_2 покрытий:

1 – алюминиевые сплавы; 2 – стали; 3 – медные сплавы

Для сохранения контрастности знаков необходимо обеспечить над углублением (см. рис. 2) получение непрозрачного слоя цветного осадка, что требует наклона боковой поверхности под углом α , зависящим от напряжения на электродах (рис. 4).

Контрастность знаков повышается по мере увеличения угла α , т.е. с увеличением напряжения на электродах и толщины покрытия. Однако при этом контрастность и читаемость наружного контура снижается с увеличением угла α (с уменьшением напряжения и толщины покрытия). Для шрифтов с высотой знаков менее 3 мм получение качественных знаков возможно при толщине покрытий на детали до 0,1 мм.

Если используется технологическая схема, приведенная на рис. 1, б – с прокалыванием эластичного слоя, то значение межэлектродного зазора снижается до нескольких микрон, что ускоряет процесс маркирования, дает возможность получить контрастный контур знаков при любой толщине покрытия, снизить напряжение на электродах до 3 В, а давление впрыска рабочей среды до 0,5 МПа (зависит от свойств и толщины покрытия). Однако в схеме, приведенной на рис. 1, б, конструкция растрового инструмента и средства его управления заметно усложняются, поскольку требуются механизмы индивидуального перемещения элементов, их отвод после контакта с деталью, точная дозировка объемов рабочей среды, подавае-

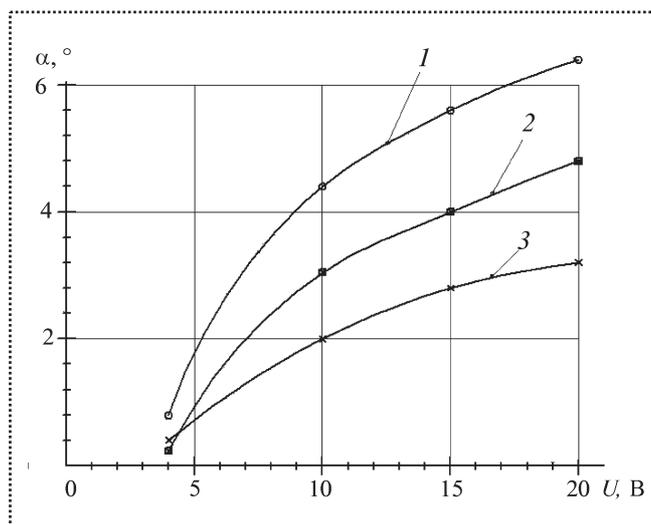


Рис. 4. Изменение угла α наклона боковой поверхности знака от напряжения U на электродах (глубина знака 30 мкм, толщина покрытия 60 мкм):

1 – алюминиевые сплавы; 2 – стали; 3 – медные сплавы

мой в пространство между покрытием и деталью. Поэтому такую схему используют только при больших (от нескольких до сотен миллиметров) толщинах диэлектрических покрытий и случае, если невозможно местное удаление защитного слоя (например, в собранном узле).

Для дозированной подачи под давлением рабочей среды в зону маркирования по схеме, представленной на рис. 1, а, удобно использовать серийные инжекторы типа БИ (рис. 5, а на стр. 3 обложки), а по схеме, представленной на рис. 1, б – игольчатые приборы типа ИИ (рис. 5, б на стр. 3 обложки). Технические характеристики инжекторов представлены в табл. 2.

Показанные в табл. 2 инжекторы имеют небольшую массу (портативные), не требуют применения внешних источников энергии (давление струи жидкости создается рычажным механизмом с незначительной силой нажатия), обладают запасом рабочей среды, достаточной для выполнения нескольких операций по нанесению информации. Серийный выпуск приборов позволяет обеспечить их сервисное обслуживание, невысокую стоимость и достаточную надежность.

Приборы развивают высокое давление, достаточное для прошивания эластичных покрытий с толщиной, превышающей рекомендуемый диапазон (см. табл. 1). Запас давления позволяет преодолеть адгезионные связи между покрытием и дета-



Характеристики инжекторов

Прибор	Дозирование жидкости, мл		Давление на срезе сопла, МПа	Сила давления на рычаг, Н	Угол распыла, град.	Наибольшая толщина покрытия (резина), мм	Масса, г
	Наибольший объем	Минимальная доза, %					
Безыгольный типа БИ	4	0,25 ± 10	200 + 10	300	15	0,6	250
Игольный типа ИИ	10	0,1 ± 10	20 + 10	100	–	Не ограничена	800

лю, а также (при дозированной подаче) обеспечить в зоне маркирования равномерного слоя рабочей жидкости, необходимой для получения качественной информации растровым электродом-инструментом.

Выводы

1. Разработано новое технологическое приложение для использования растрового электрода-инструмента при нанесении информации на металлические детали без удаления эластичного диэлектрического покрытия, что позволяет вносить информацию на сборные узлы без их демонтажа и восстановления защитного слоя, например по результатам регламентных работ (дата выполнения, номер регламента и др.)

2. Показаны технологические возможности и определены режимы растрового маркирования деталей с покрытием, что позволяет установить экономиче-

ски обоснованные границы эффективного применения растрового метода.

3. Предложены варианты применения для реализации предложенного метода нанесения информации серийно выпускаемых инжекторов, обеспечивающих нанесение качественных информационных массивов на металлические детали с толщиной покрытий, рекомендуемых для применения в промышленности.

Библиографический список

1. **Осеков А.Н.** Механизм размерного формирования информационных знаков в диэлектрических покрытиях // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2011. № 4/3. С. 62–66.

2. **Патент РФ** № 2237569. Способ заточки пустотелых колющих медицинских инструментов / А.Н. Некрасов, В.П. Смоленцев, А.В. Бондарь, В.В. Агеев, В.Г. Авдюгин, В.Ю. Некрасов. Бюл. изобр. № 28. М.: 2004.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4
Учредитель ООО "Издательство **Машиностроение**".

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;
редакции журнала: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: (499) 268-38-42; тел./факс (499) 268-85-26; факс 269-48-97.

Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*

Сдано в набор 26.12.13 г. Подписано в печать 27.02.14 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".

Отпечатано в ООО "Белый ветер", 115407, г. Москва, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4.