ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ

9 2016 (194)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологическая оснастка для сборки

Сысоев С.Н., Литвинов И.С. Рычажные корректирующие устройства и метод сопряжения осесимметричных изделий 3

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Антонец И.В. Разработка и исследование весоизмерительного устройства на основе упругого кольца и фотоприемной линейки 8

Соединение деталей машин

Самохвалов В.Н. Расчет параметров процесса сборки металлокомпозитных узлов давлением импульсного магнитного поля 12

Трение и смазка в машинах и механизмах

Гурьянов Г.Н. Изменение показателей напряженного состояния и запаса прочности проволоки при отклонении коэффициента трения от номинального значения 18

Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачёва Н.Ю., Поляков А.О., Косарев И.В., Медвинская Н.С. Технологические возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок 30

В помощь конструктору, технологу

Иванов Ю.В., Курносенко А.Е. Основные задачи, решаемые программным комплексом "Контур" компьютерного проектирования роботизированных средств ГАСК сборки электронной аппаратуры в условиях многономенклатурного производства 36

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

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

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

Ф.М. МИТЕНКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

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

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

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

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

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

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ХАБАРОВСК
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

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

ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

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

ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ. Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63953 от 09.12.2015 г.

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

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

9 2016 (194)

CONTENTS

Technological equipment for assembly

Sysoev S.N., Litvinov I.S. Lever-type devices for location correction and conjugation method for axisymmetric parts 3

Quality assurance. Testing. Monitoring

Antonets I.V. Research and development of weighing device on the basis of the elastic ring and of a receiving line 8

Connection of mashines parts

Samohvalov V.N. Calculation of the parameters compounds metal and composite materials pressure pulsed magnetic field 12

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Guryanov G.N. Changes of indicators of stress state and strength reserve of wire when the deviation of the friction coefficient from the nominal value 18

Shchedrin A.V., Kostryukov A.A., Chihacheva N.Yu., Polyakov A.O., Kosarev I.V., Medvinskaya N.S. Technological possibilities of the combined method of surface broach holes backpressure metalplacking lubricants 30

Industrial and design engineer's aid

Ivanov Yu.V., Kurnosenko A.E. Basic features of computer-aided workcell design software "Contour" for high-mix electronic manufacturing 36

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

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

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

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTYUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

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

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

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland

P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

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

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

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

УДК 621.7.067

С.Н. Сысоев, *д-р техн. наук,* **И.С. Литвинов** *(Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых)*
E-mail: xaoc1908@yandex.ru

Рычажные корректирующие устройства и метод сопряжения осесимметричных изделий

Проанализированы рычажные корректирующие устройства с комбинированной адаптацией и рефлекторной системой управления. Описан новый способ сборки осесимметричных изделий, разработанный с применением метода исследования функционально-физических связей. Приведены результаты натурных экспериментов рычажного корректирующего модуля, использующего новый метод сборки, подтверждена эффективность метода.

Much attention is given to investigation of lever-type devices for location correction which run by means of combined method with reflex control system. The article describes new assembly method for axisymmetric parts which was generated by method of functional-physical relations research. Data about results of empirical research of correction device which use new method are given. Efficiency of new method is confirmed.

Ключевые слова: коррекция положений изделий, рычажные устройства, комбинированный метод, рефлекторная система управления, метод сборки, осесимметричные изделия.

Keywords: parts location correction, lever-type devices, combined method, reflex control system, assembly method, axisymmetric parts.

В настоящее время актуально повышение эффективности автоматизированных сборочных операций, выполняемых на завершающих этапах производственного цикла изготовления изделий. Большинство производимых узлов содержат осесимметричные изделия типа "вал—втулка", для автоматической сборки которых широко применяют корректирующие устройства и технологии, позволяющие скомпенсировать погрешности позиционирования сопрягаемых изделий.

В автоматизированном технологическом комплексе втулку жестко закрепляют на спутнике и подают транспортером в рабочую зону сборки. Сборочный манипуляционный механизм с подсистемой коррекции взаимного положения сопрягаемых изделий перемещает вал в направлении торцевой поверхности втулки до соприкосновения с ее поверхностью, прижимает его, определяет направление требуемого движения коррекции, наклоняет вал в этом направлении, перемещает до соприкосновения боковых поверхностей, а затем выпрямляет вал, осуществляя сборку.

Из всего многообразия технологий и оборудования, применяемых в автоматизированных производствах для сопряжения осесимметричных изделий, наиболее эффективны корректирующие устройства с комбинированной адаптацией [1], рефлекторной системой управления [2], где используются причинные взаимосвязи между физическими явлениями, происходящими в технологическом процессе.

При установке вала в отверстие втулки с исходным рассогласованием положения их осей силовое взаимодействие вала с торцевой поверхностью втулки приводит к перекосу вала, направленному в сторону требуемой коррекции положения его оси [3]. Противоположная закономерность наблюдается при

установке изделия типа "втулка" на вал. Возникает перекос втулки, направленный в сторону, противоположную направлению требуемой коррекции положения ее оси.

С использованием принципа построения систем на основе организации причинных взаимосвязей между физическими явлениями и функциями разработан ряд рычажных устройств коррекции положения сопрягаемых осесимметричных изделий [4]. Устройства снабжены рычажной системой, состоящей из стержней, расположение которых в процессе сборки используется для перемещения объекта манипулирования в требуемом направлении и коррекции взаимного положения сопрягаемых изделий. По числу стержней корректирующие устройства подразделяют на двух- и одностержневые.

Первоначально в рычажной системе корректирующих устройств использовали два стержня [5, 6], расположенные между подвижным рабочим органом и захватом, шарнирно соединенные между собой и подпружиненные в среднем положении. За счет разницы длины стержней достигается организация рычага, силовое воздействие от которого реализует требуемое направление перемещения изделия.

Выполнение системы рычагов, основанное на взаимодействии двух стержней, сложно по конструкции, а корректирующее перемещение объекта манипулирования ограничено разницей длин стержней.

Корректирующие устройства, имеющие в рычажной системе один стержень, отличаются простотой конструкции и расширенной величиной корректирующего перемещения объекта манипулирования [7, 8].

Корректирующее устройство (рис. 1) установлено на подвижном рабочем органе *1*. Стержень *2* подпружинен в среднем положении и расположен между подвижным рабочим органом и захватом *3* с закрепленным объектом манипулирования валом *4* или втулкой *5*. При перекосе объекта манипулирования в процессе его сопряжения с изделием, установленным на рабочей поверхности *6*, изменяет свое положение стержень *2*. При манипулировании валом (см. рис. 1, *а*) нижний конец стержня смещается от оси перемещения подвижного рабочего органа в направлении требуемой коррекции и создается силовое воздействие на перемещение вала в данном направлении. При манипулировании втулкой (см. рис. 1, *б*) верхний конец стержня смещается от оси перемещения подвижного рабочего органа в направлении, противоположном требуемой коррекции, что приводит к силовому воздействию на перемещение втулки в требуемом направлении.

Использование всей длины рычага увеличивает размер шага коррекции положения изделий, существенно упрощает конструкцию устройства и его производительность.

Выполнение граничных условий [3] возникновения перекоса вала при его силовом взаимодействии с торцевой поверхностью втулки является условием необходимым, но недостаточным для выполнения всего процесса сборки. Применение рычажных корректирующих устройств ограничено силами сопротивления корректирующему перемещению вала относительно втулки, возникающими в местах их контактного взаимодействия. Кроме этого, стремление к увеличению шага коррекции приводит к увеличению угла наклона вала, что повышает вероятность заклинивания собираемых изделий и невозможности выполнения сборки.

Для выявления возможности расширения граничных условий применения рычажных корректирующих устройств

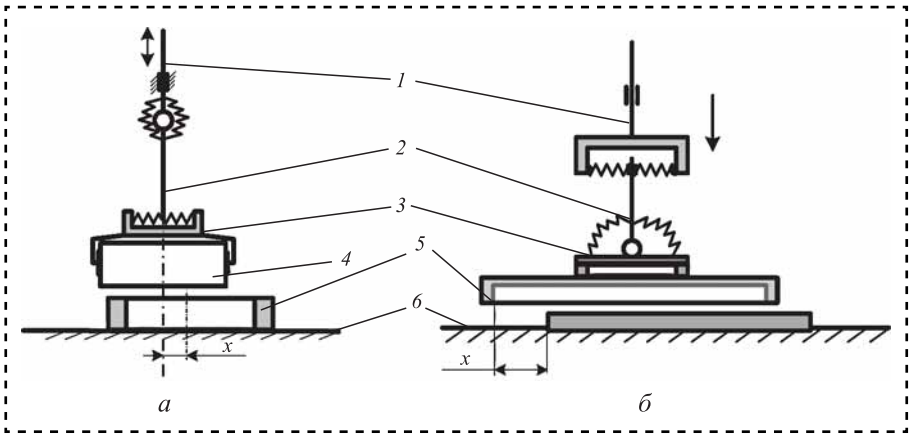


Рис. 1. Схемы рычажных корректирующих устройств для установки:
а — вала в отверстие втулки; *б* — втулки на вал

сопряжения осесимметричных изделий проведем анализ их работы методом исследования функционально-физических связей (МИФФС) [4]. Объект исследования — однорычажное корректирующее устройство с валом, сопрягаемым с втулкой, установленной на рабочей поверхности (см. рис. 1, *а*). Предмет исследования — процессы, происходящие при манипулировании положением вала относительно втулки при их сопряжении.

Используя МИФФС, сформировали структуры потребностей, функций и физических явлений. Выявили существенные физические явления, организовали конструктивные причинные взаимосвязи между ними, устраняя деструктивные.

Структуру физических явлений исследуемой системы представим в виде:

$$J_{\text{и.п}} \to J_{\text{оп}} \to J_{\text{н.в}} \to \begin{cases} \to J_{\text{п.в}} \\ \to J_{\text{в.в}} \end{cases} \to J_{\text{к.п}},$$

где $J_{\text{и.п}}$, $J_{\text{оп}}$, $J_{\text{н.в}}$, $J_{\text{п.в}}$, $J_{\text{в.в}}$, $J_{\text{к.п}}$ — физические явления, происходящие в исследуемой системе в процессе выполнения механизмом функций соответственно исходного положения, опускания вала в направлении торцевой поверхности втулки, наклона вала в направлении требуемой коррекции, перемещения вала относительно втулки, выпрямления оси вала, конечного положения.

Рассмотрим физические явления, сопровождающие выполнение требуемых функций, ограничившись силовыми взаимодействиями вала с втулкой и втулки с рабочей поверхностью, возникающие в результате вертикального перемещения подвижного рабочего органа (рис. 2).

Физические явления, составляющие множество J и соответствующие заданным функциям устройства, описываются выражениями:

$$\forall J_{\text{и.п}} \exists\ [(F_{\text{пр}} = 0) \wedge (F_{\text{с в-вт}} = 0) \wedge (F_{\text{кор в-вт}} = 0) \wedge \wedge (F_{\text{вт-р.п}} = F_{\text{с вт-р.п}})];$$

$$\forall J_{\text{оп}} \exists\ [(F_{\text{пр}} = 0) \wedge (F_{\text{с в-вт}} = 0) \wedge (F_{\text{кор в-вт}} = 0) \wedge \wedge (F_{\text{вт-р.п}} = F_{\text{с вт-р.п}})];$$

$$\forall J_{\text{н.в}} \exists\ [(1 > F_{\text{пр}} > 0) \wedge (F_{\text{с в-вт}} > F_{\text{кор в-вт}}) \wedge \wedge (F_{\text{с в-вт}} > F_{\text{кор в-вт}} > 0) \wedge (F_{\text{вт-р.п}} = F_{\text{с вт-р.п}})];$$

$$\forall J_{\text{п.в}} \exists\ [(F_{\text{пр}} = 1) \wedge (F_{\text{кор в-вт}} > F_{\text{с в-вт}}) \wedge \wedge (F_{\text{кор в-вт}} > F_{\text{с в-вт}}) \wedge (F_{\text{вт-р.п}} = F_{\text{с вт-р.п}})];$$

$$\forall J_{\text{к.п}} \exists\ [(F_{\text{пр}} = 0) \wedge (F_{\text{с в-вт}} = 0) \wedge (F_{\text{кор в-вт}} = 0) \wedge \wedge (F_{\text{вт-р.п}} = F_{\text{с вт-р.п}})],$$

где 1 и 0 — соответственно наличие и отсутствие J.

Анализ физических явлений показывает, что условием начала выполнения функции перемещения вала относительно втулки является превышение силы, действующей на вал в направлении требуемой коррекции его положения над силой сопротивления перемещению вала относительно втулки. Силу сопротивления можно уменьшить, например, выполняя вал или втулку с технологической фаской, что делать не всегда допускается.

Исходя из анализа силового взаимодействия элементов системы установлено, что в процессе сборки втулка испытывает силовое воздействие в направлении требуемой коррекции ее положения относительно вала. В существующей системе это силовое воздействие компенсируется реакцией жесткого крепления ее в спутнике. Устранение данной деструктивной причинной взаимосвязи расширяет граничные условия применения рычажных корректирующих устройств.

Предложено устанавливать втулку на рабочую поверхность с возможностью ее перемещения в процессе сборки на величину максимальной коррекции положения. Коррекцию

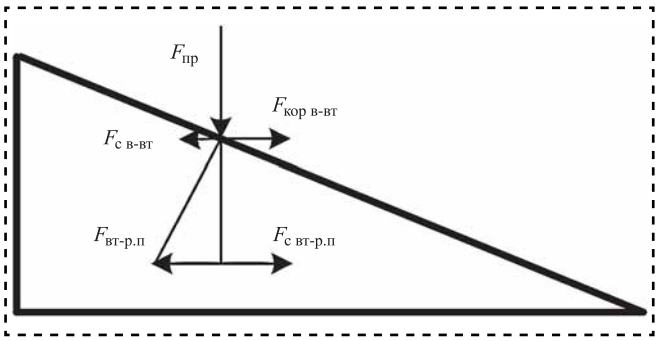


Рис. 2. Схема распределения силового взаимодействия элементов системы в процессе сопряжения изделий:
$F_{\text{пр}}$ — силовое воздействие со стороны приводного механизма; $F_{\text{с в-вт}}$ — сила сопротивления перемещению вала относительно втулки; $F_{\text{кор в-вт}}$ — сила, действующая на вал в направлении требуемой коррекции его положения; $F_{\text{вт-р.п}}$ — силовое воздействие вала на втулку вдоль рабочей поверхности; $F_{\text{с вт-р.п}}$ — сила сопротивления перемещению втулки по рабочей поверхности

взаимного положения осей изделий осуществлять посредством перемещения валом втулки в направлении, противоположном наклону вала.

В данном методе сборки изделий типа "вал—втулка", включающем перемещение вала в направлении торцевой поверхности втулки до соприкосновения торца вала с ее поверхностью, прижатие вала к поверхности втулки, наклон вала в направлении рассогласования положений осей вала и втулки, коррекцию взаимного положения осей деталей с одновременным выпрямлением вала, корректируют взаимное положение осей деталей перемещением валом втулки в направлении, противоположном его наклону.

Пример реализации метода рычажным корректирующим устройством показан на рис. 3. При соприкосновении торца вала с торцевой поверхностью втулки вал перекашивается в направлении рассогласования положений осей вала и втулки, вследствие чего рычаг изменяет свое положение (рис. 3, *а*). Силовое воздействие на втулку со стороны вала, направленное в сторону, противоположную наклону вала, при возрастании силы прижатия вала к поверхности втулки приводит к тому, что вал перемещает втулку влево (рис. 3, *б*), приводя к одновременному уменьшению угла наклона вала и рассогласования взаимного положения *x* сопрягаемых деталей.

На рис. 4 показан алгоритм сборки осесимметричных изделий рычажными корректирующими устройствами, а на рис. 5 — пример характерных параметров системы при выполнении функции сборки.

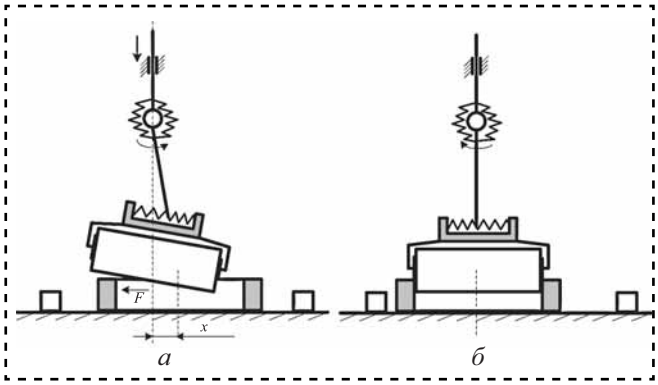


Рис. 3. Этапы метода коррекции валом положения втулки

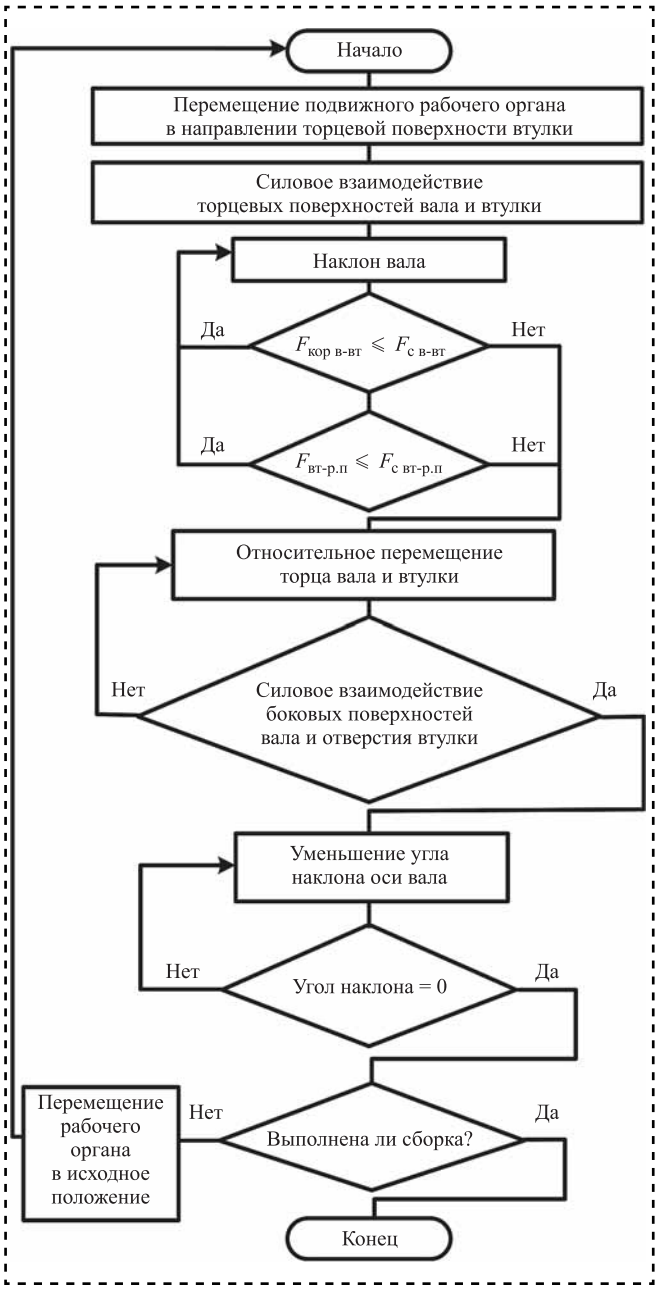


Рис. 4. Алгоритм сборки осесимметричных изделий рычажными корректирующими устройствами

Макетирование и натурные исследования, проводимые в лаборатории кафедры автоматизации технологических процессов Владимирского государственного университета, подтвердили эффективность метода коррекции и его промышленную применимость.

В процессе натурного эксперимента анализировали работу однорычажного корректирующего модуля в условиях, когда втулка жестко закреплена на рабочей поверхности (рис. 6, *б*),

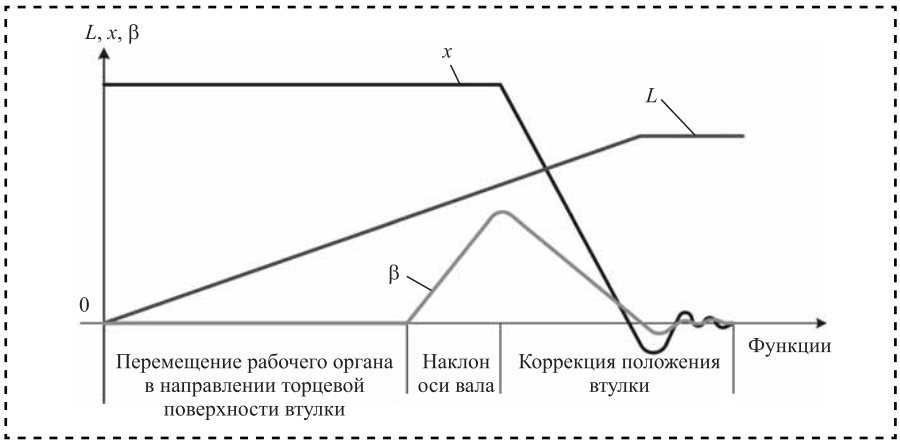


Рис. 5. График параметров системы при выполнении функции сборки:
x — рассогласование координаты оси втулки подвижного рабочего органа; β — угол наклона оси втулки; L — координата перемещения рабочего органа

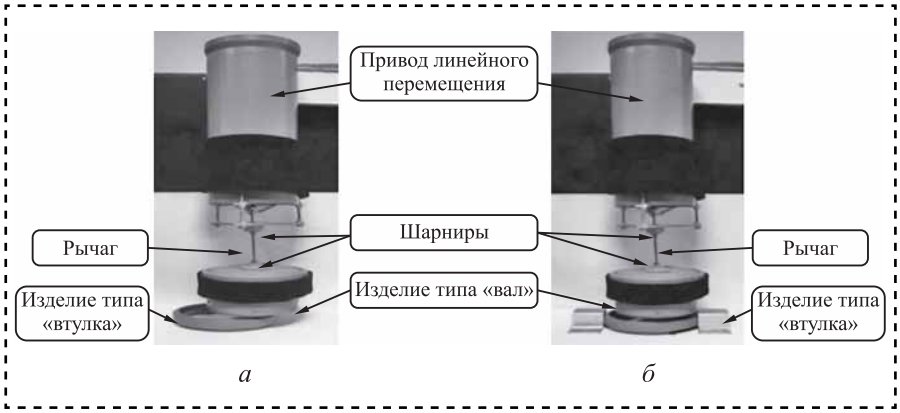


Рис. 6. Макет однорычажного корректирующего модуля

и работу корректирующего модуля с применением нового способа коррекции, когда она не закреплена на рабочей поверхности (рис. 6, *а*). Вал жестко закреплен в захвате корректирующего модуля, диаметр вала 110 мм, фаска 5 мм×15°, диаметр втулки 112 мм, длина рычага 100 мм. Исследования проводили при смещении вала относительно втулки от 5 до 20 мм.

В результате эксперимента установили, что реализация сдвига втулки валом позволяет, в данном случае, обеспечить сборку изделий с величиной первоначального отклонения вала относительно втулки большей на 5 мм.

Выводы

Выявленные граничные условия применения рычажных корректирующих устройств позволяют прогнозировать их использование с учетом конкретных производственных условий. Методика нахождения инновационных технических решений подтверждает эффективность МИФФС. Метод сопряжения осесимметричных изделий, основанный на коррекции валом положения втулки, расширяет граничные условия применения рычажных корректирующих устройств.

Библиографический список

1. **Сысоев С.Н.** Устройства коррекции положения сопрягаемых изделий // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. Ковров: "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2013. С. 71—80.

2. **Управление** дискретными процессами в ГПС / Л.С. Ямпольский и др. К.: Тэхника; Вроцлав: Изд-во Вроцлав, политехн. ин-та; Токио: Токосе, 1992. 251 с.

3. **Сысоев С.Н., Еропова Е.В.** Исследование граничных условий применения метода многократной коррекции положения сопрягаемых изделий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2011. № 7. С. 3—6.

4. **Сысоев С.Н.** Принципы и методы нахождения технических решений. Метод исследования функционально-физических связей. Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2007. 214 с.

5. **Пат. 115711 РФ, МПК B25J 15/06.** Захватный корректирующий модуль / С.Н. Сысоев, Е.В. Еропова, Т.Н. Коробова. № 2011145329/02; заявл. 08.11.11; опубл. 10.05.12, Бюл. № 13. 3 с.

6. **Пат. 147155 РФ, МПК B25J 15/06.** Захватный корректирующий модуль / С.Н. Сысоев, И.С. Литвинов, Юнце Цао. № 2014111416/06; заявл. 25.03.14; опубл. 27.10.14, Бюл. № 30. 3 с.

7. **Пат. 128150 РФ, МПК B25J 15/06.** Захватный корректирующий модуль / С.Н. Сысоев, А.В. Столяров. № 2012152328/02; заявл. 15.12.12; опубл. 20.05.13, Бюл. № 14. 3 с.

8. **Сысоев С.Н., Литвинов И.С., Овчинников В.А.** Рычажные устройства автоматизированного процесса сборки изделий типа "вал—втулка" // International Research Journal. 2015. № 9 (40). Ч. 2. С. 96—99.

УДК 624.869.72-5

И.В. Антонец, *д-р техн. наук (Ульяновский институт гражданской авиации имени главного маршала авиации Б.П. Бугаева)*
E-mail: iv.antonec@yandex.ru

Разработка и исследование весоизмерительного устройства на основе упругого кольца и фотоприемной линейки

Исследован опытный образец принципиально нового весоизмерительного устройства на основе кольцевого упругого чувствительного элемента с использованием фотоприемной линейки в качестве датчика линейных перемещений при измерении деформации. Данное решение позволяет повысить точность результатов измерения, а возможность размещения вторичного устройства в малом объеме корпуса позволила уменьшить габаритные размеры кольцевого элемента с сохранением его чувствительности.

Prototype of a fundamentally new weight measuring device based on a ring of elastic sensitive element using a photodetector line as a sensor of linear displacement in the deformation measurement is investigated. This solution allows to increase the accuracy of measurement results, and the possibility of placing a secondary device in a small enclosure volume, allowed to reduce the dimensions of the annular elastic sensitive element while maintaining its sensitivity.

Ключевые слова: кольцевой упругий элемент, чувствительный элемент, деформация упругого элемента, фотоприемная линейка, оптические методы обработки информации.

Keywords: the elastic annular element, the sensing element, the deformation of the elastic element, photodetector line, optical methods of information processing.

В качестве наиболее эффективных датчиков деформации упругого элемента (УЭ) весоизмерительных устройств используют фотоэлектрические преобразователи деформации. В большинстве фотодатчиков преобразование входной неэлектрической величины в электрический сигнал осуществляется в два этапа: сначала происходит ее преобразование в изменение одного из параметров светового потока (силы света, освещенности, спектрального состава и т.п.), а затем это изменение преобразуется фотоэлементом в электрическую величину (фототок, падение напряжения, фото-ЭДС и т.д.) [1]. Основная проблема подобных датчиков — высокая зависимость от стабильности светового потока, температуры и относительно низкая чувствительность, вследствие измерения только части величины деформации.

Оптические методы обработки информации предполагают наличие фотоприемных устройств (ФПУ), позволяющих преобразовывать пространственное распределение светового поля в электрический сигнал [2]. Представителями данного типа устройств являются фотоприемные линейки и матрицы на основе приборов с зарядовой связью [3]. В фотоприемных линейках отдельные фоточувствительные элементы (пиксели) расположены вдоль одной координаты, в матрицах пиксели равномерно заполняют прямоугольное поле.

Принцип работы данных устройств заключается в формировании внутри каждого пикселя электрического сигнала, пропорционального поглощенной им оптической энергии. Достигается это благодаря фоточувствительному *p-n*-переходу (как в фотодиоде), через который происходит разряд конденсатора фотоприемного элемента. Чем выше оптическая мощность, попадающая на пиксель, тем больше величина тока фотодиода и тем с большей скоростью будет разряжаться конденсатор. В конце цикла измерения происходит считы-

вание остаточного заряда конденсаторов пикселей. При последовательном опросе пикселей на выходе фотоприемного многоэлементного устройства формируется электрический сигнал, у которого изменение амплитуды во времени отображает распределение оптической мощности в пространстве фотоприемного устройства.

Разработан и изготовлен опытный образец весоизмерительного устройства на основе кольцевого упругого чувствительного элемента (УЧЭ) с использованием датчика линейных перемещений для измерения деформации УЭ. В основе датчика линейных перемещений лежит фотоприемник Toshiba TCD 1304 — прибор с зарядовой связью, обеспечивающий возможности его применения в качестве датчика линейного перемещения.

Исходя из технических характеристик фотоприемника, дискретность снятия отсчетов при применении линейки в качестве позиционно-чувствительного датчика составляет 8 мкм. Выход фотоприемника — аналоговый видеосигнал, поэтому для цифровой обработки и передачи информации необходимо применение аналого-цифрового преобразователя.

В качестве источника излучения применен светодиод. В отличие от электронной схемы для фотоприемника Мультискан, в данной схеме не требуется стабилизация потока излучения светодиода, так как каждая точка фотоприемника опрашивается последовательно и результаты опроса следуют последовательно в виде видеосигнала.

Схема весоизмерительного устройства на основе кольцевого УЧЭ с использованием датчика линейных перемещений приведена на рис. 1.

Устройство содержит кольцевой УЧЭ *1* и последовательно соединенные источник *2* и приемник *3* оптического излучения, а также шторку *4*. Источник оптического излучения *2* и фотоприемное устройство *3* механически связаны с верхним приливом кольцевого УЧЭ, а шторка *4* механически связана с нижним приливом кольцевого УЧЭ. Шторка имеет щель, расположенную таким образом, что проходящее через нее излучение от источника формирует на поверхности фотоприемного устройства *3* узкое световое пятно. Фотоприемное устройство располагается вертикально, параллельно шторке, а источник оптического излучения — напротив центра фотоприемного устройства. Источник оптического излучения и шторки устанавливают таким образом, чтобы в отсутствие внешнего воздействия на кольцевой УЧЭ световое пятно, формируемое щелью в шторке, находилось около верхней части фотоприемного устройства.

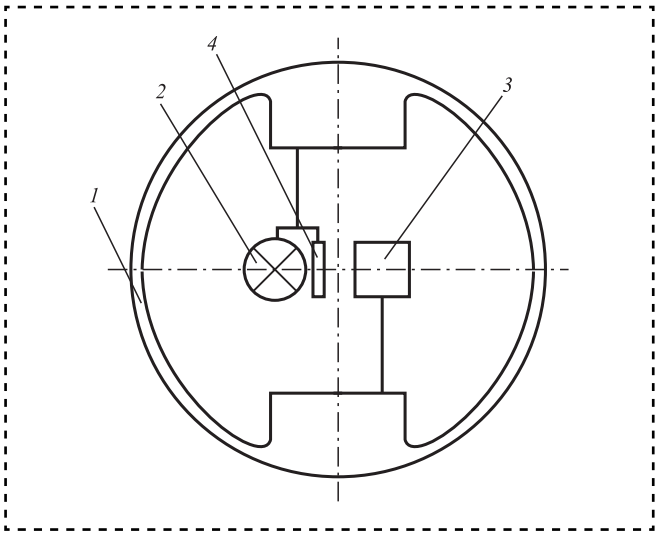


Рис. 1. Схема весоизмерительного устройства на основе кольцевого УЧЭ с использованием датчика линейных перемещений

Функциональная схема весоизмерительного устройства (рис. 2) содержит ФПУ на основе многоэлементной фотоприемной линейки *2* и неинвертирующий вход компаратора *5*. Инвертирующий вход компаратора *5* подключен к первому аналоговому выходу микроконтроллера *8*. Инвертирующий выход компаратора подключен к входу разрешения счета первого цифрового счетчика *6* и первому входу микроконтроллера *8*. Неинвертирующий выход компаратора подключен к входу разрешения второго цифрового счетчика *7*.

Первый выход генератора импульсов *4* подключен к первому управляющему входу ФПУ *2* и к входам сброса первого и второго счетчиков, а второй выход генератора импульсов *4* подключен ко второму управляющему входу ФПУ *2* и к счетным входам первого и второго счетчиков. Выход первого счетчика *6* подключен ко второму входу микроконтроллера *8*, выход второго счетчика *7* подключен к третьему цифровому входу микроконтроллера *8*. Второй

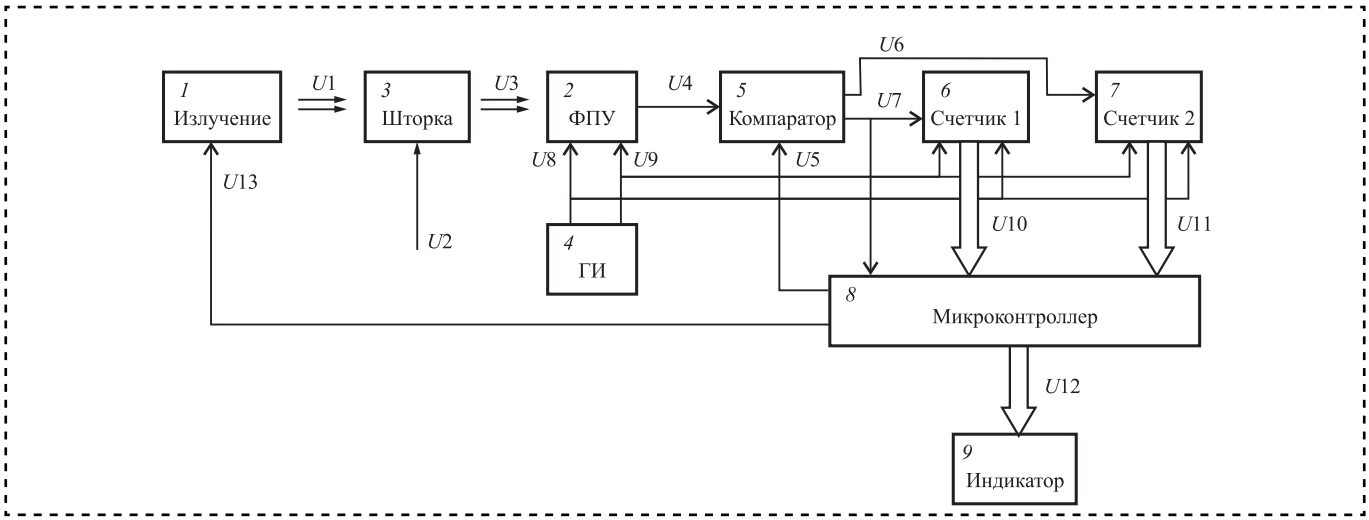


Рис. 2. Функциональная схема весоизмерительного устройства

аналоговый выход микроконтроллера *8* подключен к входу управления источника оптического излучения *1*. Цифровой выход микроконтроллера подключен к входу индикаторного устройства *9*.

Устройство работает следующим образом. Оптическое излучение *U*1 от источника *1* падает на шторку *3*. Прошедшее через щель в шторке излучение *U*2 формирует на поверхности ФПУ *2* узкое световое пятно. ФПУ на основе многоэлементной фотоприемной линейки, преобразует пространственное распределение падающей на его поверхность оптической мощности *U*2 в периодически изменяющийся во времени электрический сигнал *U*4. Это обеспечивается подачей на ФПУ *2* управляющих сигналов *U*8, *U*9 от генератора импульсов *4* (рис. 3).

Управляющий сигнал *U*8 задает период последовательного опроса всех элементов фотоприемной линейки *2*, а сигнал *U*9 задает длительность опроса каждого отдельного элемента. Амплитуда электрического сигнала в каждый момент времени пропорциональна оптической мощности, падающей на опрашиваемый в данный момент элемент фотоприемной линейки. В результате на выходе ФПУ формируется периодический электрический сигнал *U*4, в котором пространственному распределеию оптической мощности

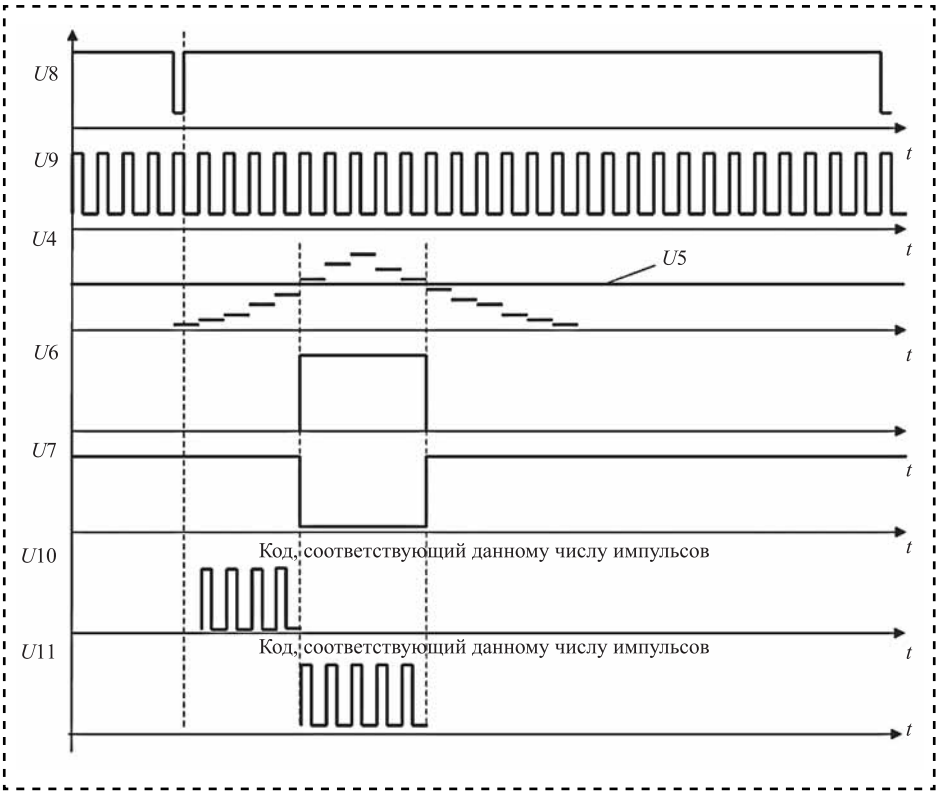


Рис. 3. Эпюры сигналов на различных выходах ПЗС-линейки

в пределах фоточувствительной поверхности ФПУ ставится в соответствие распределение во времени амплитуды электрического сигнала в пределах периода сигнала $U8$. Микроконтроллер обрабатывает поступившие цифровые коды по формуле:

$$U12 = k(U10 + U11/2),$$

где k — калибровочный коэффициент.

Выходной сигнал микроконтроллера пропорционален номеру того элемента фотоприемной линейки *2*, на который попадает середина светового пятна. Сигнал $U12$ поступает на вход индикаторного устройства *9*. При воздействии измеряемой силы на нижнее плечо кольцевого УЧЭ шторка *3* сдвигается вниз относительно исходного положения. Это приводит к тому, что световое пятно от щели в шторке *3* перемещается сверху вниз по фоточувствительной поверхности фотоприемного устройства *2*. Цифровой код $U12$ увеличивается прямо пропорционально смещению светового пятна и, соответственно, прямо пропорционально приложенной к кольцевому УЧЭ измеряемой силы. Индикаторное устройство *9* отображает величину измеряемой силы (рис. 4).

Установлено, что перемещение по рабочей области фотоприемника узкого участка светового пятна более предпочтительно, чем изменение размера светового пятна. В этом случае практически полностью отсутствует влияние отклонений мощности источника оптического излучения и чувствительности ФПУ на точность измерения деформации УЭ.

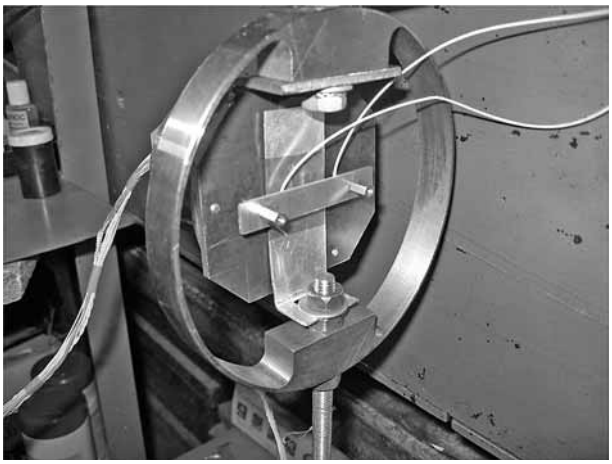


Рис. 4. Стенд для проведения исследований

Изменение расстояния между источником излучения и шторкой и между источником излучения и ФПУ влияет на чувствительность системы. Возможность размещения вторичного устройства в малом объеме корпуса позволяет уменьшить габариты кольцевого УЧЭ с сохранением его чувствительности.

Библиографический список

1. **Антонец И.В., Табаков В.П., Финогенов Д.Э.** Весоизмерительные устройства с кольцевым упругим элементом и вторичным фотодатчиком // Сборка в машиностроении и приборостроении. 2006. № 12. С. 21—25.

2. **Латыев С.М.** Конструирование точных (оптических) приборов. СПб.: Политехника, 2007.

3. **Муханин Л.Г.** Схемотехника измерительных устройств. СПб.: Лань, 2009. 282 с.

УДК 621.757:621.7.044.7

В.Н. Самохвалов, *д-р техн. наук*
(Самарский национальный исследовательский университет имени Королева)
E-mail: samohvalov_vn@mail.ru

Расчет параметров процесса сборки металлокомпозитных узлов давлением импульсного магнитного поля

Изложена методика расчета эпюры давления импульсного магнитного поля для сборки узлов из деталей, выполненных из композиционных материалов, с использованием металлических втулок.

The technique for calculating diagrams pulsed magnetic field pressure subassemblies of parts made from composite materials, using metal sleeves.

Ключевые слова: композиционный материал, сборка, магнитно-импульсный метод.

Keywords: composite, assembly, magnetic pulse method.

Возможность применения технологии сборки сложных пакетов и элементов конструкции из композиционных материалов энергией импульсного магнитного поля с использованием промежуточных металлических элементов (наконечников, переходных втулок и т.п.) обусловлена комплексом особенностей процесса магнитно-импульсной сборки:

— импульсным характером приложения нагрузки и возможностью строгой дозировки подводимой энергии, которые позволяют проводить сборку сложных пакетов из металлических элементов с хрупкими неметаллическими основаниями (керамика, стекло, углепластик, композиционные материалы);

— повышением плотности и прочности сборки соединений за счет дополнительной термической опрессовки, обусловленной протеканием больших вихревых токов в процессе деформирования соединительного элемента;

— принципиальной возможностью управления радиальным и осевым распределением давления импульсного магнитного поля по поверхности деформируемых соединительных элементов.

Виды металлокомпозитных узлов

Технологию магнитно-импульсной сборки применяют для получения неразъемных соединений полых деталей из композиционных материалов между собой или с опорными деталями конструкции, работающими в условиях больших осевых или крутящих нагрузок, обеспечивающих герметичность и вакуумную плотность соединения.

Прочность металлокомпозитного соединения обеспечивается за счет радиального натяга между соединяемыми элементами; геометрического замыкания путем деформирования полого металлического элемента импульсным магнитным полем в канавки или пазы, выполненные на опорной детали; формообразования площадок или отбортовки кромок на металлических элементах металлокомпозитного пакета. Прочность соединений в этом случае может превышать прочность отдельных соединяемых элементов.

Для повышения прочности контакта металла с композиционными элементами за счет радиального натяга возможно создание клеевого соединения. Магнитно-импульсный обжим

обеспечивает в этом случае минимальную толщину и равномерность клеевого слоя, а следовательно, высокую прочность соединения.

Высокая хрупкость многих композиционных материалов требует определенных затрат энергии на сборку и точных пространственно-временных параметров магнитно-импульсного нагружения для заданного конечного формоизменения металлических элементов металлокомпозитного соединения.

Для моделирования процессов сборки пакетов, содержащих детали из композиционных материалов, с помощью энергии импульсного магнитного поля (ИМП) разработаны методы расчета количества подводимой энергии и управления параметрами магнитно-импульсного нагружения.

Расчет полей сил при магнитно-импульсной сборке металлокомпозитных узлов

Различная геометрия соединительных элементов и граничные условия, реализующиеся в процессах получения соединений разных форм, обусловливают самые разнообразные схемы напряженно-деформированного состояния материала соединительных элементов и связанные с этим энергозатраты на сборку соединения и требуемые поля давлений. В конструкциях летательных аппаратов наиболее распространены узлы из тонкостенных трубчатых деталей из композиционных материалов.

Задача расчета процесса сборки металлокомпозитного соединения — определение пространственных и временных параметров магнитно-импульсного нагружения для получения соединения заданной формы и размеров, с необходимым распределением пластических деформаций в соединительном элементе и упругих напряжений в соединении.

Процесс динамического формоизменения металлических элементов (наконечников, переходных втулок и т.п.) при магнитно-импульсном нагружении характеризуется неоднородностью полей напряжений и деформаций в материале, обусловленной волновым характером деформационного процесса — распространением продольных и поперечных волн пластических деформаций. Следствием этого является волновой перенос энергии от зон приложения нагрузки и ее перераспределение по объему деформируемого соединительного элемента.

С позиций волновой динамики, развитие прогибов при свободном формоизменении соединительной втулки определяется как [1]:

$$dy = \frac{V(x,t)}{C_2}dx; \quad Y'(x) = \frac{V(x,t)}{C_2},$$

где $V(x, t)$ — скорость нормального перемещения точек образующей соединительной втулки;

$Y'(x)$ — производная функции $Y(x)$, описывающей заданную конечную форму втулки в соединении;

C_2 — скорость поперечных волн деформации.

Для определения начальных параметров магнитно-импульсного нагружения, исходя из заданной геометрии контактной поверхности металл—композит, приняты следующие допущения:

1. Деформируемые соединительные элементы (наконечники, переходные втулки и т.п.) рассматриваются как безмоментные оболочки, ввиду малой относительной толщины их стенки в зоне образования соединения с композиционным материалом.

2. На начальном этапе действия давления ИМП, перемещение соединительной втулки мало, и можно пренебречь изменением параметров разрядного контура.

3. На первом этапе векторы скоростей движения элементов втулки нормальны к образующей, изменение кривизны меридиана стенки соединительного элемента мало, и поэтому можно пренебречь меридиональными напряжениями в стенке трубчатой втулки.

4. Скорость поперечных волн деформаций C_2 постоянна в пределах формуемого элемента соединительного узла.

В первом приближении без учета волнового переноса энергии по заданной форме детали $Y(x)$ можно определить необходимую эпюру скоростей и кинетическую энергию отдельных элементов заготовки, которая затем перейдет в работу пластического деформирования соединительной втулки.

Расчет полей сил и энергии формообразования соединения проводят по отдельным формуемым элементам на соединительной втулке

независимо друг от друга. Энергозатраты на получение соединения равны сумме работ на деформирование отдельных элементов рельефа соединительной втулки.

Удельная работа пластического деформирования единичного объема материала соединительной втулки a_i с учетом степенной аппроксимации динамической диаграммы $\sigma_i(\varepsilon_i)$:

$$a_i = \int_0^{\varepsilon} \sigma_i d\varepsilon_i = \frac{B}{n+1} \varepsilon_i^{n+1},$$

где σ_i — интенсивность напряжения в материале;

ε_i — интенсивность деформации;

B и n — константы динамического изотропного упрочнения материала втулки.

Интенсивность и распределение деформаций по объему полученного соединения при динамическом формоизменении изначально неизвестны, так как определяются не только геометрией заготовки, граничными условиями, но и градиентом нагрузки, которая в данном случае является искомой.

В общем случае интенсивность деформации

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(\varepsilon_m - \varepsilon_\theta)^2 + (\varepsilon_\theta - \varepsilon_\rho)^2 + (\varepsilon_\rho - \varepsilon_m)^2},$$

где ε_m — меридиональная деформация;

ε_θ — тангенциальная деформация;

ε_ρ — радиальная деформация.

Приняв $\lambda = \varepsilon_\theta/\varepsilon_m$, с учетом условия постоянства объема получим [1]:

$$\varepsilon_\rho = -\varepsilon_m(1+\lambda); \ \varepsilon_\theta = \lambda\varepsilon_m; \quad \varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_m\sqrt{\lambda^2+\lambda+1};$$

$$\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\varepsilon_\theta\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}+\frac{1}{\lambda}+1}.$$

При деформировании трубчатого соединительного элемента с начальным радиусом R_0 при получении заданной формы его образующей $Y(x)$ в соединении тангенциальная деформация:

$$\varepsilon_\theta(x) = Y(x)/R_0.$$

В результате имеем

$$\varepsilon_i(x) = \frac{Y(x)}{R_0}\frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}+\frac{1}{\lambda}+1}.$$

Для расчета интенсивности деформаций по длине образующей соединительного элемента заданной конечной формы $Y(x)$ достаточно знать одну из компонент деформированного состояния — функцию $\lambda(x)$ и исходные размеры втулки соединительного элемента.

Диапазон изменений параметра λ, определяющего схему деформированного состояния соединительного элемента для трубчатой втулки:

$-2 \leqslant \lambda \leqslant \infty$, $\lambda = -2$ на свободном торце соединительной втулки, где равны радиальная и меридиональная деформации $\varepsilon_\rho = \varepsilon_m$;

$\lambda = \infty$ на переходе тонкостенной втулки к массивной части соединительного элемента, где равны радиальная и тангенциальная деформации $\varepsilon_\rho = \varepsilon_\theta$;

$\lambda = 0; -1; \infty$ — реализуется плоское деформированное состояние, где $\varepsilon_\theta = \varepsilon_\rho = \varepsilon_m = 0$.

Параметр λ определяет также характер протекания деформационного процесса. В диапазоне $-2 \leqslant \lambda < 0$ значения радиальной деформации соединительной втулки ε_ρ положительны, т.е. процесс деформирования идет с подтяжкой материала в очаг деформации, а при $\lambda > 0$ радиальная деформация ε_ρ отрицательна, т. е. формоизменение идет за счет утонения стенки втулки соединительного элемента.

Элементы рельефа, получаемого при сборке металлокомпозитного соединения:

1) сборка за счет радиального натяга между соединяемыми элементами — создание цилиндрической поверхности широкого кольцевого пояска: $\lambda = \infty$, так как при большой длине пояска $\varepsilon_m \approx 0$;

2) сборка за счет геометрического замыкания путем деформирования полого металлического элемента ИМП в канавки или пазы, выполненные на опорной детали — узкий кольцевой поперечный рифт шириной b без цилиндрического пояска и переходная зона широкого рифта (при допущении, что деформация идет на фронте поперечной волны): $0 \leqslant \lambda \leqslant \infty$; $\lambda(x) = [x/(b^2 - bx)]^k$;

3) сборка соединения отбортовкой кромок на металлических элементах металлокомпозитного пакета — торцевой элемент длиной a: $-2 \leqslant \lambda \leqslant 0$; $\lambda(x) = [-2x/a]^k$.

Показатель $k = f(\nabla P)$ зависит от градиента нагрузки и изначально неизвестен, поэтому в первом приближении $k = 1$.

Назначая в зависимости от условий задачи закон изменения $\lambda(x)$, по одной известной компоненте деформированного состояния соединительной втулки рассчитывают распределение интенсивности деформаций по ее длине $\varepsilon_i = f(x)$. Это позволяет найти зависимость, описывающую распределение удельных работ пластического деформирования по объему материала стенки (длине образующей) осесимметричной соединительной втулки: $a = f(x)$.

Удельная работа, совершаемая давлением ИМП над единичным объемом материала деформируемой части соединительной втулки равна:

$$a_m = \int_{y_0}^{y_p} p_m(y)dy + \frac{\rho s}{2}\mathrm{v}_m^2,$$

где v_m — скорость стенки втулки в конце участка разгона;

ρ — плотность материала соединительной втулки;

s — толщина стенки втулки;

p_m — давление импульсного магнитного поля.

Первый член этой формулы учитывает долю энергии ИМП, перешедшую в работу пластической деформации на участке разгона стенки соединительной втулки, второй — полученную при этом кинетическую энергию, преобразующуюся затем в работу окончательного формоизменения втулки при образовании соединения.

Для кольцевого элемента безмоментной трубчатой соединительной втулки, с учетом принятых допущений, уравнение движения на участке разгона импульсом давления магнитного поля p_m имеет вид:

$$\rho s\frac{d^2y}{dt^2} = p_m - p_\sigma;\ \ p_\sigma = \frac{\sigma_\theta s}{R_0},$$

где p_σ — давление, соответствующее динамической несущей способности трубчатой втулки.

Учитывая

$$\sigma_\theta = \frac{4}{3}\frac{\sigma_i(\varepsilon_i)}{\varepsilon_i}\left(\varepsilon_\theta + \frac{1}{2}\varepsilon_m\right)$$

и полагая, что на участке разгона $\sigma_i \approx \sigma_s$, так как перемещения малы, имеем

$$p_\sigma = \frac{s}{R}\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\frac{\lambda + 0,5}{\sqrt{\lambda^2 + \lambda + 1}}.$$

Для трубчатой соединительной втулки работой пластической деформации на участке разгона пренебречь нельзя, поэтому:

$$a_m = a_p + \frac{\rho}{2}\mathrm{v}_m^2;$$

$$a_p = \sigma_s\varepsilon_i = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\varepsilon_\theta\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda} + 1};\ \ \varepsilon_\theta = \ln\frac{h_p}{R_0}.$$

Радиальное перемещение стенки втулки на участке разгона

$$h_p = \int_{t_н}^{t_к}\mathrm{v}(t)dt,$$

где $t_н$, $t_к$ — время начала и окончания разгона трубчатой заготовки под действием импульса давления магнитного поля.

Изменение давления ИМП на соединительную втулку описывается зависимостью

$$p_m = p_0\sin^2\omega t,$$

где ω — круговая частота разрядного тока;

p_0 — амплитуда первой полуволны давления ИМП.

Тогда

$$t_н = \frac{1}{\omega}\arcsin\sqrt{\frac{p_\sigma}{p_0}};\ \ t_к = \frac{1}{\omega}\left(\pi - \arcsin\sqrt{\frac{p_\sigma}{p_0}}\right);$$

$$\mathrm{v} = \int_{t_н}^{t_к}\frac{p_0\sin^2\omega t - p_\sigma}{\rho s'}dt.$$

После интегрирования получаем максимальную скорость движения стенки соединительной втулки в конце участка разгона:

$$\mathrm{v}_m = \frac{p_0}{\rho s\omega}\left(\frac{\pi}{2} - A + \frac{1}{2}\sin 2A\right) - \frac{p_\sigma}{\rho s\omega}(\pi - 2A);$$

$$A = \arcsin\sqrt{\frac{p_\sigma}{p_0}};\ \ h_p = \frac{p_0 - p_\sigma}{4\rho s\omega^2}\left(\pi^2 - 2\pi A\right).$$

Для удельной работы пластической деформации трубчатой соединительной втулки имеем:

$$a_m = \left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\sqrt{\frac{1}{\lambda^2} + \frac{1}{\lambda} + 1}\right)\ln\left[\frac{p_0 - p_\sigma}{4R_0\rho s\omega^2}\left(\pi^2 - 2\pi A\right)\right] +$$

$$+ \frac{1}{2\rho s^2\omega^2}\left[p_0\left(\frac{\pi}{2} - A + \frac{1}{2}\sin 2A\right) - p_\sigma(\pi - 2A)\right]^2.$$

Так как работа сил ИМП преобразуется в работу пластического деформирования

материала соединительной втулки ($a_м = a$), после преобразований имеем:

$$\frac{B}{n+1}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{Y(x)}{R_0}\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}+\frac{1}{\lambda}+1}\right)^{n+1} -$$
$$-\frac{2\sigma_s}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}+\frac{1}{\lambda}+1}\left[\frac{p_0(x)-p_\sigma(x)}{4R_0\rho s\omega^2}\left(\pi^2-2\pi A\right)\right]-$$
$$-\frac{1}{2\rho s^2\omega^2}\left[p_0(x)\left(\frac{\pi}{2}-A+\frac{1}{2}\sin 2A\right)-p_\sigma(x)(\pi-2A)\right]^2=0.$$

Это уравнение может быть решено с использованием численных методов относительно эпюры давления $p_0(x)$ ИМП по длине зоны соединения металлического элемента с композиционным материалом. Круговая частота разрядного тока в индукторе ω первоначально может быть определена исходя из условия оптимального согласования индуктора с выбранной магнитно-импульсной установкой. После проведения уточненных расчетов параметров индукторной системы значение круговой частоты разрядного тока может быть скорректировано.

Рассчитанная эпюра давления импульсного магнитного поля $p_0(x)$ позволяет реализовать свободное формоизменение соединительной втулки, которое исключает ее чрезмерное силовое воздействие на хрупкий композиционный материал по всей контактной поверхности получаемого соединения.

Полученная эпюра давления дает возможность определить размеры и форму рабочей зоны индуктора, а также энергию заряда магнитно-импульсной установки.

Давление ИМП на соединительную втулку определяется (при отсутствии просачивания) касательной к ее поверхности составляющей напряженности магнитного поля:

$$p = 0,5\mu_0 H_\tau^2.$$

Для определения H_τ, генерируемой в искомой точке на поверхности осесимметричной соединительной втулки с прямолинейной образующей, с произвольно расположенной относительно нее токоведущей секцией индуктора, использован метод зеркальных отображений, позволяющий учесть реакцию заготовки вследствие наведения в ней вихревых токов. Принято допущение о равномерной плотности тока по ширине рабочей зоны токоведущей секции, что приемлемо для многовитковых индукторов и при больших относительных рабочих зазорах (в первом приближении для одновитковых индукторов, без учета краевых эффектов). В этом случае для системы "индуктор—втулка" с прямолинейной образующей соединительной втулки напряженность H_τ в каждой точке на поверхности соединительной втулки имеет вид [2]:

$$H_\tau = \frac{H_0}{\pi}\left[\frac{\Delta\cos\gamma + x'\cos\gamma\sin\gamma}{\Delta + x'\sin\gamma}\times\right.$$
$$\times\left(\operatorname{arctg}\frac{l - x'\cos\gamma}{\Delta + x'\sin\gamma} + \operatorname{arctg}\frac{x'\cos\gamma + l}{\Delta + x'\sin\gamma}\right)-$$
$$\left.-\frac{\sin\gamma}{2}\ln\left(1+\frac{l^2+2x'l\cos\gamma}{\Delta^2+(x')^2+2x'\Delta\cos\gamma}\right)\right];\ H_0 = \frac{IN}{l},$$

где l — длина рабочей зоны (секции) индуктора;

Δ — минимальный рабочий зазор между втулкой и индуктором;

γ — угол наклона секции индуктора к образующей соединительной втулки;

N, I — число витков в секции и сила тока в них;

$$x' = (x - x_0)\cos\gamma - (y - y_0)\sin\gamma,$$

где x_0, y_0 — относительное смещение начала базовой (связанной с образующей втулки) и местной (связанной с секцией индуктора) систем координат.

Полученная зависимость может быть использована для расчета параметров индукторной системы, исходя из заданной формы эпюры давления ИМП:

$$[H_\tau(x)]_т = \sqrt{\frac{2p(x)}{\mu_0}},$$

где $p(x)$ — заданная эпюра давления;

$[H_\tau(x)]_т$ — требуемое распределение напряженности ИМП на поверхности соединительной втулки.

Для этого функция $[H_\tau(x)]_т$ аппроксимируется выражением для H_τ. В случае втулки с прямолинейной образующей задача заключается в определении соответствующих значений неизвестных: I, l, Δ, γ по четырем наиболее характерным точкам заданной формы эпюры давления ИМП. Для каждой точки

записывается отдельное уравнение. Задача сводится к решению системы четырех уравнений для нахождения четырех неизвестных с применением системы MathCAD.

Эти значения являются исходными при последующем численном моделировании процесса расчета оптимальных параметров сборки металлокомпозитных узлов сложной геометрической формы давлением ИМП.

Энергия заряда магнитно-импульсной установки на осуществление технологической операции сборки соединения первоначально определяется выражением:

$$W = A_{\Sigma}/(K_1K_2K_3K_4K_5K_6),$$

где $A_{\Sigma} = \Sigma A_i$ — суммарная работа пластического деформирования всех элементов рельефа соединительной втулки; $K_1...K_6$ — коэффициенты, учитывающие потери на всех этапах преобразования энергии заряда конденсаторов в работу пластического деформирования деталей соединения [3].

Полная работа формоизменения отдельного элемента рельефа соединения

$$A_i = \int_{v} a dv.$$

Для трубчатой соединительной втулки

$$A_i = 2\pi \int_0^l \frac{B}{n+1}\left[\varepsilon_i(x)\right]^{n+1} sY(x)dR,$$

где $\varepsilon_i(x) = \frac{Y(x)}{R_0}\frac{2}{\sqrt{3}}\sqrt{\frac{1}{\lambda^2}+\frac{1}{\lambda}+1}.$

Решение можно получить путем численного интегрирования по всему деформированному объему материала соединительной втулки в соединении.

Библиографический список

1. **Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В.** Расчет параметров магнитно-импульсного нагружения при сборке соединителей проводов контактной сети // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 1. С. 32—37.
2. **Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В.** Управление параметрами нагружения при сборке соединителей проводов контактной сети магнитно-импульсным методом // Вестник транспорта Поволжья. 2014. № 2. С. 24—28.
3. **Самохвалова Ж.В., Григорьев В.Л., Самохвалов В.Н.** Сборка стыковых соединений проводов контактной подвески давлением импульсного магнитного поля // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2006. № 8. С. 4—11.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

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

УДК 621.778.014

Г.Н. Гурьянов, *канд. техн. наук*
(ООО "ФЕНИКС +", г. Белорецк, Республика Башкортостан)
E-mail: ggnbelorhome@rambler.ru

Изменение показателей напряженного состояния и запаса прочности проволоки при отклонении коэффициента трения от номинального значения

Дана оценка степени отклонения показателей процесса волочения от их номинальных значений при положительном и отрицательном приросте коэффициента трения при разных параметрах деформации и моделях упрочнения материала проволоки. Форма кривой упрочнения влияет на показатели напряженного состояния и запас прочности проволоки, степень изменения этих показателей при отклонении коэффициента трения от номинального значения. Противонатяжение снижает абсолютную и относительную величину отклонения осевого напряжения и коэффициента запаса прочности при изменении коэффициента трения.

Evaluating the degree of deviation of the drawing process from their nominal values at positive and negative increase in coefficient of friction at different deformation parameters and models of hardening of the material of the wire. The shape of the curve of hardening has an effect on the stress state and safety factor of the wire, the degree of change in these indicators in the deviation of the friction coefficient from the nominal value. The tensioning system reduces the absolute and relative magnitude of the deviation of axial stress and factor of safety when changing the coefficient of friction.

Ключевые слова: волочение, проволока, стабильность напряженного состояния, запас прочности, модель упрочнения, номинальный коэффициент трения, калибрующий поясок волоки.

Keywords: drawing, wire, stability, stress state, robustness, hardening model, the nominal coefficient of friction, calibrating belt-drawing dies.

В процессе волочения изменяются реологические свойства смазки и обрабатываемого материала проволоки (прутка), микрорельеф поверхностей рабочего канала волоки и протягиваемой заготовки, условия подачи смазки в очаг деформации, интенсивность его охлаждения, что влияет на коэффициент контактного трения. В результате нестабильность силы волочения и других энергосиловых показателей пластического формоизменения заготовки снижают эксплуатационную стойкость узлов и элементов волочильного стана. Колебание силы волочения вызывает изменение запаса прочности проволоки как в очаге пластической деформации, так и на выходе волоки. Напряжения волочения изменяются при отклонении параметров деформации от их номинальных значений [2]. При отклонениях угла волочения от оптимальной величины $\alpha_{опт}$ на ±1 и ±2° напряжение волочения σ_Z увеличивается на 0,3...2,2 %, но существенно повышаются дополнительные годовые затраты энергии на участке грубого волочения стальной проволоки. Расчет дополнительных годовых затрат энергии [3] выполнен при коэффициенте трения 0,05 и степенной зависимости напряжения текучести от коэффициента вытяжки

$$\sigma_{Si} = \sigma_{S0}\mu^k, \quad (1)$$

где σ_{S0}, σ_{Si} — соответственно напряжение текучести металла на входе рабочего конуса во-

локи и при текущем значении коэффициента вытяжки μ;

k — коэффициент упрочнения;

μ — коэффициент вытяжки, $\mu = (r_0/r_k)^2$;

r_0, r_k — радиусы заготовки до и после деформации.

В процессах обработки металлов давлением кривую упрочнения задают формулой

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + m\varepsilon^n = \sigma_{S0} + m(\ln\mu)^n, \qquad (2)$$

где m, n — эмпирические коэффициенты;

$\varepsilon = \ln\mu$ — степень деформации при волочении.

В зависимости (2) больше эмпирических коэффициентов, поэтому она дает возможность представлять более сложные формы кривых упрочнения, чем степенная функция (1).

При волочении проволоки могут существенно изменяться параметры деформации и использоваться материалы с разными формами кривой упрочнения. Поэтому представляет интерес оценка значений основных показателей процесса волочения при оптимальном $\alpha_{опт}$ и неоптимальном α угле рабочего конуса, а также степень изменения показателей напряженного состояния и запаса прочности при отклонении параметров деформации от их номинальной величины при разных моделях упрочнения.

Цель работы — при разных параметрах деформации и моделях упрочнения материала проволоки оценить значения показателей напряженного состояния и запаса прочности и степень различия этих показателей при номинальном значении коэффициента трения, а также значениях, которые меньше и больше номинального.

На выходе рабочего конуса осевое напряжение $\sigma_{Zк}$ рассчитывали по формуле

$$\sigma_{Zк} = \sigma_{Z1} + \sigma_{Z2} + \sigma_{Cd}, \qquad (3)$$

где σ_{Z1} — прирост осевого напряжения в рабочем конусе;

σ_{Z2} — прирост от действия напряжения противонатяжения σ_q;

σ_{Cd} — прирост напряжения на деформацию сдвига металла.

Составляющие формулы (3) для моделей упрочнения (1) и (2) определяются соответствующими зависимостями [4, 5]:

$$\sigma_{Z1} = \frac{\sigma_{S0}}{k}\left(\mu^k - 1\right)\left(1 + f/\operatorname{tg}\alpha\right); \qquad (4)$$

$$\sigma_{Z1} = \left[\sigma_{S0}\ln\mu + \frac{m}{n+1}(\ln\mu)^{n+1}\right]\left(1 + f/\operatorname{tg}\alpha\right); \qquad (5)$$

$$\sigma_{Z2} = \sigma_q\left[1 - \frac{f\left(\mu^k - 1\right)}{k\operatorname{tg}\alpha}\right]; \qquad (6)$$

$$\sigma_{Z2} = \sigma_q\left[1 - \frac{f}{\operatorname{tg}\alpha}\left(\ln\mu + \frac{m(\ln\mu)^{n+1}}{\sigma_{S0}(n+1)}\right)\right]; \qquad (7)$$

$$\sigma_{Cd} = \frac{2\sigma_{S0}\operatorname{tg}\alpha\left(1 + \mu^k\right)}{3\sqrt{3}}; \qquad (8)$$

$$\sigma_{Cd} = \frac{2\operatorname{tg}\alpha\left(2\sigma_{S0} + m(\ln\mu)^n\right)}{3\sqrt{3}}. \qquad (9)$$

В работе [6] предложена формула для расчета прироста осевого напряжения в пояске, учитывающая напряженное состояние в рабочем конусе

$$\sigma_{Zп} = 2fL\left(\sigma_{Sк} - \sigma_{Zк}\right)/r_k, \qquad (10)$$

где $\sigma_{Zк}$ — осевое напряжение на выходе рабочего конуса.

Прирост $\sigma_{Zп}$ зависит от параметров деформации через напряжение $\sigma_{Zк}$, определяемое также формой кривой упрочнения [4, 5].

Осевое напряжение на выходе калибрующего пояска волоки равно

$$\sigma_Z = \sigma_{Zк} + \sigma_{Zп}. \qquad (11)$$

Абсолютный запас прочности при коэффициенте вытяжки μ с учетом принятых моделей упрочнения (1) и (2) на выходе рабочего конуса:

$$Z = \sigma_{Sк} - \sigma_{Zк} = \sigma_{S0}\mu^k - \sigma_{Zк};$$

$$Z = \sigma_{S0} + m(\ln\mu)^n - \sigma_{Zк}.$$

Коэффициент запаса прочности определяли по формуле [7]

$$\gamma = \sigma_{Sк}/\sigma_{Zк}.$$

Показатель напряженного состояния рассчитывали по В.Л. Колмогорову [8, 9]

$$k_\sigma = \sigma / T,$$

где σ — среднее нормальное напряжение;

T — интенсивность касательных напряжений.

Оптимальные значения угла рабочего конуса для моделей (1) и (2) [4]:

$$\operatorname{tg}\alpha^2_{\text{опт}} = \\ = f\left(\mu^k - 1\right)\left(1 - \sigma_{q0} / \sigma_{S0}\right)/0,385k\left(\mu^k + 1\right); \quad (12)$$

$$\operatorname{tg}\alpha^2_{\text{опт}} = Af\left(1 - \sigma_{q0}/\sigma_{S0}\right)/B; \quad (13)$$

$$A = \sigma_{S0}\ln\mu + m(\ln\mu)^{n+1}/(n+1);$$

$$B = 2\sqrt{3}\sigma_{S0}\left(2 + m(\ln\mu)^n/\sigma_{S0}\right)/9.$$

Для сравнения значений прироста осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске использовали отношение

$$Ot = \sigma_{Zк}/\sigma_{Zп}. \quad (14)$$

Сравнение значений прироста осевого напряжения в калибрующем пояске выполнили по новой формуле (10) и упрощенной формуле С.И. Губкина, используя отношение

$$\nu_P = \sigma_{Zп}(10)/\sigma_{Zп},$$

где $\sigma_{Zп}(10)$ — прирост осевого напряжения в пояске по формуле (10);

$\sigma_{Zп}$ — прирост напряжения по упрощенной формуле С.И. Губкина

$$\sigma_{Zп} = 2\sigma_{Sк} fL/r_k.$$

Приняты следующие модели упрочнения:

$$\sigma_S = 1000\mu^{0,25}; \quad (15)$$

$$\sigma_S = 1000\mu^{0,75}; \quad (16)$$

$$\sigma_S = 676\mu^{1,09}; \quad (17)$$

$$\sigma_S = 340 + 950(\ln\mu)^{0,37}; \quad (18)$$

$$\sigma_S = 282 + 1218(\ln\mu)^{0,45}; \quad (19)$$

$$\sigma_S = 112 + 521(\ln\mu)^{0,415}. \quad (20)$$

Формулы (18) и (19) применяют для расчета упрочнения коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т. Зависимость (18) получена для проволочной заготовки из этой стали при термической обработке по заводскому режиму: охлаждение в воде после выдержки при 1050 °С [10]. Эмпирическая зависимость (19) получена для стали 12Х18Н10Т после отжига при температуре 900 °С в течение 4 ч с последующим охлаждением на воздухе [9]. Кривые упрочнения стали после закалки *4* и отжига *5* существенно не отличаются (рис. 1). Но сталь после отжига имеет меньшее напряжение текучести и интенсивнее упрочняется. Формула (17) дана для дисперсионно-твердеющего сплава на никелевой основе ХН40МДТЮ [10]. Режим термической обработки проволочной заготовки из сплава как у стали 12Х18Н10Т после закалки по модели (18). Латунь Л63 по модели (15) интенсивно упрочняется при малых степенях деформации (μ < 1,25), что показывает кривая *1*. Модели (15) и (16) характерны для упрочнения при холодном волочении углеродистой заготовки, подвергнутой перед деформацией термической обработке (патентирование).

На рис. 2 приведены результаты расчета показателей напряженного состояния и запаса прочности в зависимости от коэффициента вытяжки

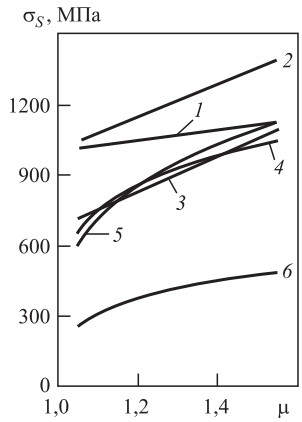


Рис. 1. Зависимости напряжения текучести от коэффициента вытяжки при разных моделях упрочнения:

1 — $\sigma_S = 1000\mu^{0,25}$ (15); *2* — $\sigma_S = 1000\mu^{0,75}$ (16); *3* — $\sigma_S = 676\mu^{1,09}$ (17); *4* — $\sigma_S = 340 + 950(\ln\mu)^{0,37}$ (18); *5* — $\sigma_S = 282 + 1218(\ln\mu)^{0,45}$ (19); *6* — $\sigma_S = 112 + 521(\ln\mu)^{0,415}$ (20)

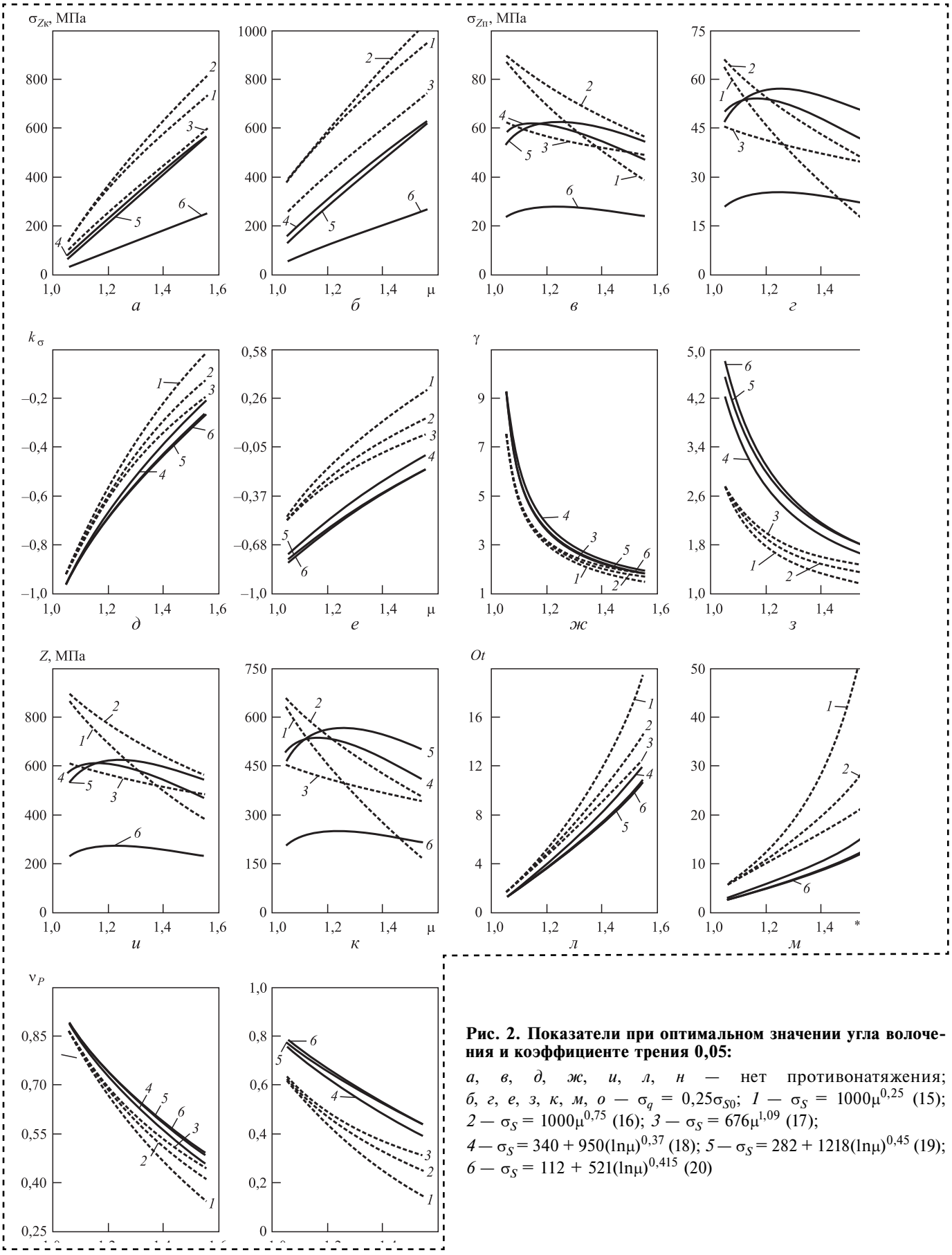


Рис. 2. Показатели при оптимальном значении угла волочения и коэффициенте трения 0,05:

а, *в*, *д*, *ж*, *и*, *л*, *н* — нет противонатяжения; *б*, *г*, *е*, *з*, *к*, *м*, *о* — $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{S0}$; *1* — $\sigma_S = 1000\mu^{0{,}25}$ (15); *2* — $\sigma_S = 1000\mu^{0{,}75}$ (16); *3* — $\sigma_S = 676\mu^{1{,}09}$ (17); *4* — $\sigma_S = 340 + 950(\ln\mu)^{0{,}37}$ (18); *5* — $\sigma_S = 282 + 1218(\ln\mu)^{0{,}45}$ (19); *6* — $\sigma_S = 112 + 521(\ln\mu)^{0{,}415}$ (20)

при $\alpha_{опт}$ для моделей упрочнения (15)—(20). Коэффициент вытяжки варьировали от 1,05 до 1,55. В этом случае относительное обжатие q по поперечному сечению изменяется от 4,8 до 35,5 %. Коэффициент трения 0,05; напряжение противонатяжения $\sigma_q = 0$ (левые графики) и $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{S0}$ (правые графики). Диаметр и длина калибрующего пояска соответственно равны 2 и 1 мм.

От приложения противонатяжения заметно увеличился прирост $\sigma_{Zк}$ осевого напряжения в рабочем конусе при малых степенях деформации ($\mu < 1, 2$) для всех моделей упрочнения. При менее интенсивном упрочнении для моделей (15)—(17) также заметен рост напряжения $\sigma_{Zк}$ от противонатяжения при больших степенях деформации (рис. 2, кривые *1—3*). Линия *5* для стали 12Х18Н10Т после отжига (19) несколько ниже линии *4* для этой стали после закалки (18), так как исходное напряжение текучести после отжига меньше. С увеличением коэффициента вытяжки линии *4* и *5* для коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т сближаются из-за интенсивного упрочнения стали после отжига. При отсутствии противонатяжения (см. рис. 2, *а*) линии *4* и *5* пересекаются, и в конце интервала варьирования коэффициента вытяжки прирост $\sigma_{Zк}$ больше у стали после отжига (19). От противонатяжения снизился прирост $\sigma_{Zп}$ осевого напряжения в пояске при всех моделях упрочнения (рис. 2, *в*, *г*). С ростом степени деформации прирост $\sigma_{Zп}$ непрерывно снижается для моделей с менее интенсивным упрочнением (линии *1—3*). При отсутствии и действии противонатяжения прирост $\sigma_{Zп}$ для коррозионно-стойкой стали и латуни несколько увеличивается при повышении коэффициента вытяжки, а затем непрерывно снижается (кривые *4—6*).

Показатель k_σ напряженного состояния по В.Л. Колмогорову непрерывно повышается с ростом коэффициента вытяжки. Его величина больше для модели (15) с менее интенсивным деформационным упрочнением (рис. 2, *д*, *е*, кривая *1*) и меньше для латуни и коррозионно-стойкой стали после отжига (соответственно кривые *6* и *5*). Чем интенсивнее деформационное упрочнение (рис. 2, *д*, *е*), тем меньше показатель k_σ напряженного состояния и более благоприятные условия деформирования без разрушения проволоки [4]. От противонатяжения показатель k_σ заметно вырос при малых степенях деформации особенно при моделях упрочнения (15)—(17), что показывает сравнение расположения кривых *1—3* на рис. 2, *д* и *е*.

Коэффициент γ запаса прочности (рис. 2, *ж*, *з*) интенсивно снижается при малых степенях деформации ($\mu < 1{,}15$). Запас прочности заметно уменьшился от действия противонатяжения (рис. 2, *з*) для моделей упрочнения (15)—(17). Кривая *1* для углеродистой стали значительно ниже кривой *6* для латуни при отсутствии и наличии противонатяжения. Формы соответствующих кривых для абсолютного запаса Z прочности (рис. 2, *и*, *к*) и для прироста осевого напряжения $\sigma_{Zп}$ в пояске (рис. 2, *в*, *г*) одинаковы. Объясняется это структурой формулы (10) для расчета прироста напряжения $\sigma_{Zп}$, которая включает запас прочности Z — разность в скобках, которая равна модулю радиального напряжения, что следует из упрощенного уравнения пластичности для осесимметричной деформации. Таким образом, для моделей (18)—(20) с интенсивным упрочнением наблюдается повышение радиального напряжения вдоль длины очага деформации при невысоких степенях деформации (кривые *4—6*). Для моделей (15)—(17) радиальное напряжение непрерывно снижается вдоль длины очага деформации (линии *1—3*).

С увеличением степени деформации увеличивается разница прироста осевого напряжения в рабочем конусе и пояске для всех моделей упрочнения (рис. 2, *л*, *м*). Отношение *Ot* больше для модели (15) с менее интенсивным упрочнением (кривая *1*) и меньше для латуни и коррозионно-стойкой стали после отжига (соответственно кривые *6* и *5*). От противонатяжения существенно снизился прирост осевого напряжения в пояске в сравнении с приростом этого напряжения в рабочем конусе (рис. 2, *м*). В результате заметно повысилось отношение *Ot* при волочении с противонатяжением. Прирост осевого напряжения в пояске по формуле (10) заметно меньше (рис. 2, *н*, *о*), чем по упрощенной формуле С.И. Губкина при повышенных обжатиях ($\mu > 1{,}3$) для модели упрочнения (15)—(17) и действии противонатяжения (рис. 2, *о*).

Оценку степени отклонения от номинальной величины показателей напряженного состояния или запаса прочности при изменении коэффициента трения покажем на примере напряжения σ_Z волочения. Рассчитывали при заданном коэффициенте f_0 трения оптимальный угол $\alpha_{опт}$ волочения и напряжение $\sigma_Z(\alpha_{опт})$ при заданном коэффициенте f_0 и найденном угле $\alpha_{опт}$. Затем при этом же $\alpha_{опт}$, но новом коэффициенте трения f_1 рассчитывали напряжение $\sigma_Z(\alpha)$. При коэффициенте f_1 величина $\alpha_{опт}$ не является оптимальной, как при коэффициенте f_0. Сравнивали степень различия напряжения σ_Z волочения при коэффициентах f_0 и f_1.

Выражения для оценки абсолютного и относительного различия значений для напряжения волочения по формуле (11) и коэффициента запаса прочности γ:

$$\Delta\sigma_Z = \sigma_Z(\alpha) - \sigma_Z(\alpha_{опт});$$

$$\Delta\gamma = \gamma(\alpha_{опт}) - \gamma(\alpha);$$

$$\delta\sigma_Z = 100\frac{\sigma_Z(\alpha) - \sigma_Z(\alpha_{опт})}{\sigma_Z(\alpha_{опт})},\ \%;$$

$$\delta\gamma = 100\frac{\gamma(\alpha_{опт}) - \gamma(\alpha)}{\gamma(\alpha_{опт})},\ \%,$$

где $\sigma_Z(\alpha)$, $\sigma_Z(\alpha_{опт})$, $\gamma(\alpha)$, $\gamma(\alpha_{опт})$ — напряжения волочения и коэффициенты запаса прочности соответственно при неоптимальных (коэффициент трения f_1) и оптимальных (коэффициент трения f_0) углах волочения.

Для технолога проволочного производства необходима оценка степени отклонения показателей процесса волочения от их номинальной величины при нестабильном коэффициенте трения. Пусть в проходе волочения установлена волока с углом рабочего конуса, обеспечивающим минимальное напряжение (силу) волочения при коэффициенте трения f_0. При волочении изменились условия контактного трения, и коэффициент трения стал f_1. Необходимо оценить размах отклонения сил волочения при коэффициенте f_1 от минимальной ее величины.

Приняли следующий метод определения влияния колебания коэффициента трения на стабильность показателей напряженного состояния и запаса прочности. При коэффициенте трения 0,05 и разных степенях деформации проволоки в проходе волочения определили оптимальные значения угла $\alpha_{опт}$ волочения, которые использовали для расчета номинальных показателей деформации. В зависимости от коэффициента вытяжки μ вычислили при оптимальном угле $\alpha_{опт}$ и коэффициенте трения 0,025 и 0,75 прирост осевого напряжения в рабочем конусе $\sigma_{Zк}$ и пояске $\sigma_{Zп}$ и коэффициент запаса прочности γ. Величина угла $\alpha_{опт}$ не является оптимальной при коэффициенте трения 0,025 и 0,75, она оптимальная при коэффициенте 0,05. Определили абсолютное и относительное изменения этих показателей при уменьшении коэффициента трения от номинальной величины 0,05 до 0,025 и при увеличении коэффициента f_0 до 0,075.

Расчеты выполнили при отсутствии и при наличии противонатяжения для трех моделей упрочнения: углеродистой стали (15), коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т после закалки (18) и латуни (20). Знак "–" на рис. 3 использовали для обозначения модуля абсолютного или относительного изменения показателя при снижении коэффициента трения от 0,05 до 0,025. Для обозначения модуля изменения показателя при увеличении коэффициента трения от 0,05 до 0,075 использовали знак "+". Таким образом, например, для модели (15) единица с минусом 1^- обозначает абсолютное или относительное снижение прироста $\sigma_{Zк}$ в рабочем конусе и пояске $\sigma_{Zп}$, увеличение коэффициента запаса прочности γ при снижении коэффициента трения от номинальной величины 0,05 до 0,025. Единица с плюсом 1^+ обозначает увеличение прироста $\sigma_{Zк}$ в рабочем конусе и пояске $\sigma_{Zп}$ и уменьшение коэффициента запаса прочности γ при росте коэффициента трения от 0,05 до 0,075.

При уменьшении и росте коэффициента трения 0,05 на 0,025 имеем равное изменение $\Delta\sigma_{Zк}$ прироста осевого напряжения в рабочем конусе для каждой модели упрочнения. Величина $\Delta\sigma_{Zк}$ больше для модели (15), так как исходное напряжение σ_{S0} текучести 1000 МПа, а для коррозионно-стойкой стали σ_{S0} = 340 МПа (18) и латуни σ_{S0} = 112 МПа (20). Изменение $\Delta\sigma_{Zк}$ несколько меньше при действии противонатяжения (рис. 3, *б*). Относительное изменение $\delta\sigma_{Zк}$ одинаково для коррозионно-стойкой стали и латуни при отсутствии противонатяжения (рис. 3, *в*). Величина $\delta\sigma_{Zк}$ снизилась от действия противонатяжения (рис. 3, *г*).

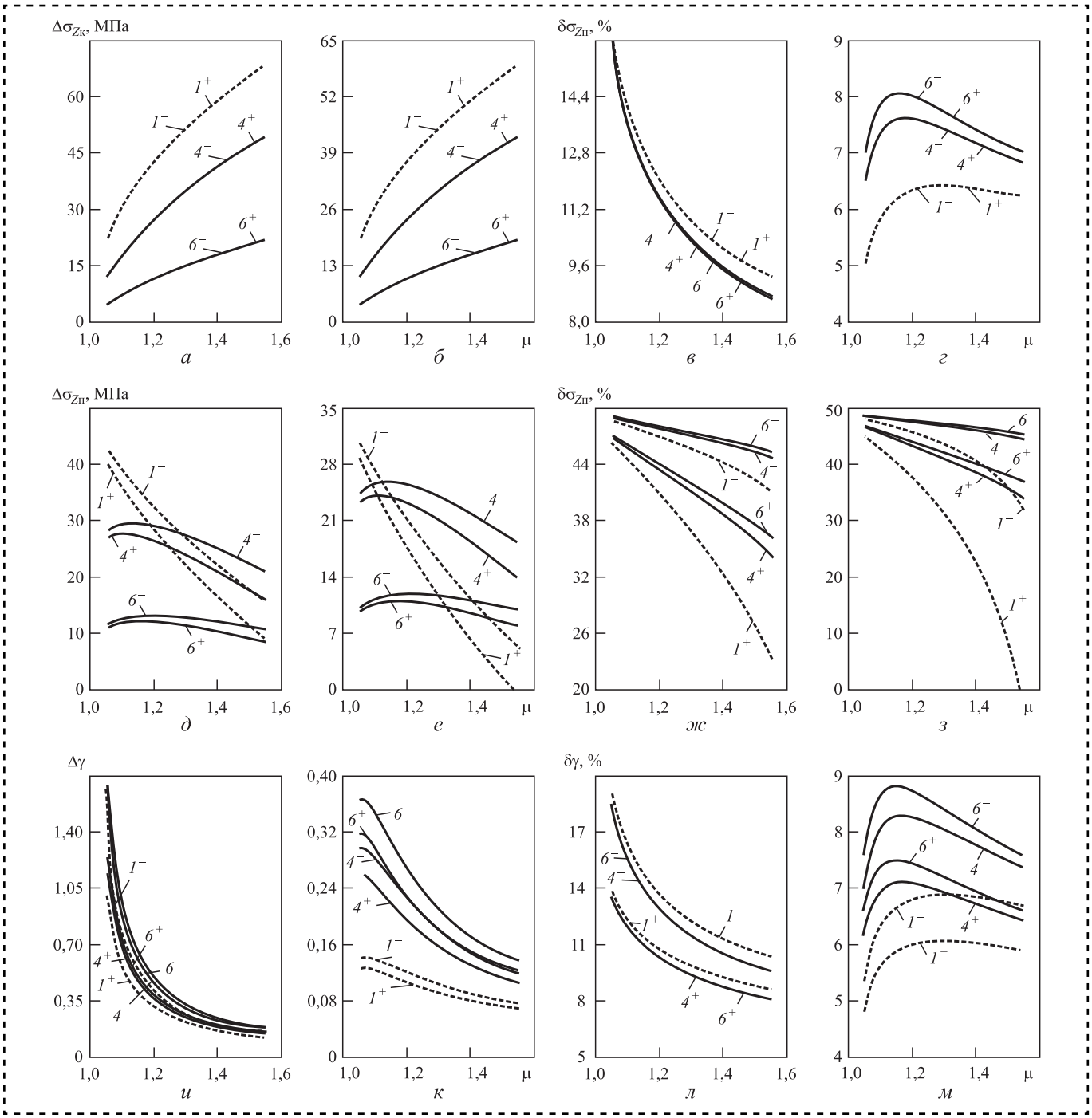


Рис. 3. Зависимость исследуемых показателей от коэффициента вытяжки:
а, *в*, *д*, *ж*, *и*, *л* — отсутствует противонатяжение; *б*, *г*, *е*, *з*, *к*, *м* — $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{S0}$; 1^-, 1^+ — $\sigma_S = 1000\mu^{0{,}25}$ (15); 4^-, 4^+ — $\sigma_S = 340 + 950(\ln\mu)^{0{,}37}$ (18); 6^-, 6^+ — $\sigma_S = 112 + 521(\ln\mu)^{0{,}415}$ (20); "+" — изменение показателей при увеличении коэффициента трения от 0,05 до 0,075; "–" — изменение показателей при уменьшении коэффициента трения от 0,05 до 0,025

Таким образом, противонатяжение стабилизирует прирост $\sigma_{Zк}$ осевого напряжения в рабочем конусе при изменении коэффициента трения.

От снижения и роста коэффициента трения на ±0,025 наблюдали разные значения для изменения прироста осевого напряжения в пояске $\sigma_{Zп}$ (рис. 3, *д*—*з*) и коэффициента запаса прочности γ (рис. 3, *и*—*м*). Абсолютные и относительные значения для изменения $\sigma_{Zп}$ и γ больше при снижении коэффициента трения от 0,05 до 0,025 (кривые обозначены с использованием знака "–"), чем при увеличении от 0,05 до 0,075. При действии противонатяжения абсолютные отклонения $\Delta\sigma_{Zп}$ и $\Delta\gamma$ и относительные значения

$\delta\sigma_{Zп}$ и $\delta\gamma$ меньше, чем при отсутствии противонатяжения. Отклонения $\Delta\sigma_{Zп}$ и $\delta\sigma_{Zп}$ снижаются с повышением коэффициента вытяжки для модели упрочнения (15), что показывают линии 1^- и 1^+ (рис. 3, *д—з*), при отсутствии противонатяжения (рис. 3, *л*) для коррозионно-стойкой стали и латуни одинаковые относительные значения $\delta\gamma$.

Абсолютная величина $\Delta\nu_P$ снижения показателя ν_P от увеличения коэффициента трения от 0,05 до 0,075 меньше при действии противонатяжения (рис. 4, *б*), чем при его отсутствии

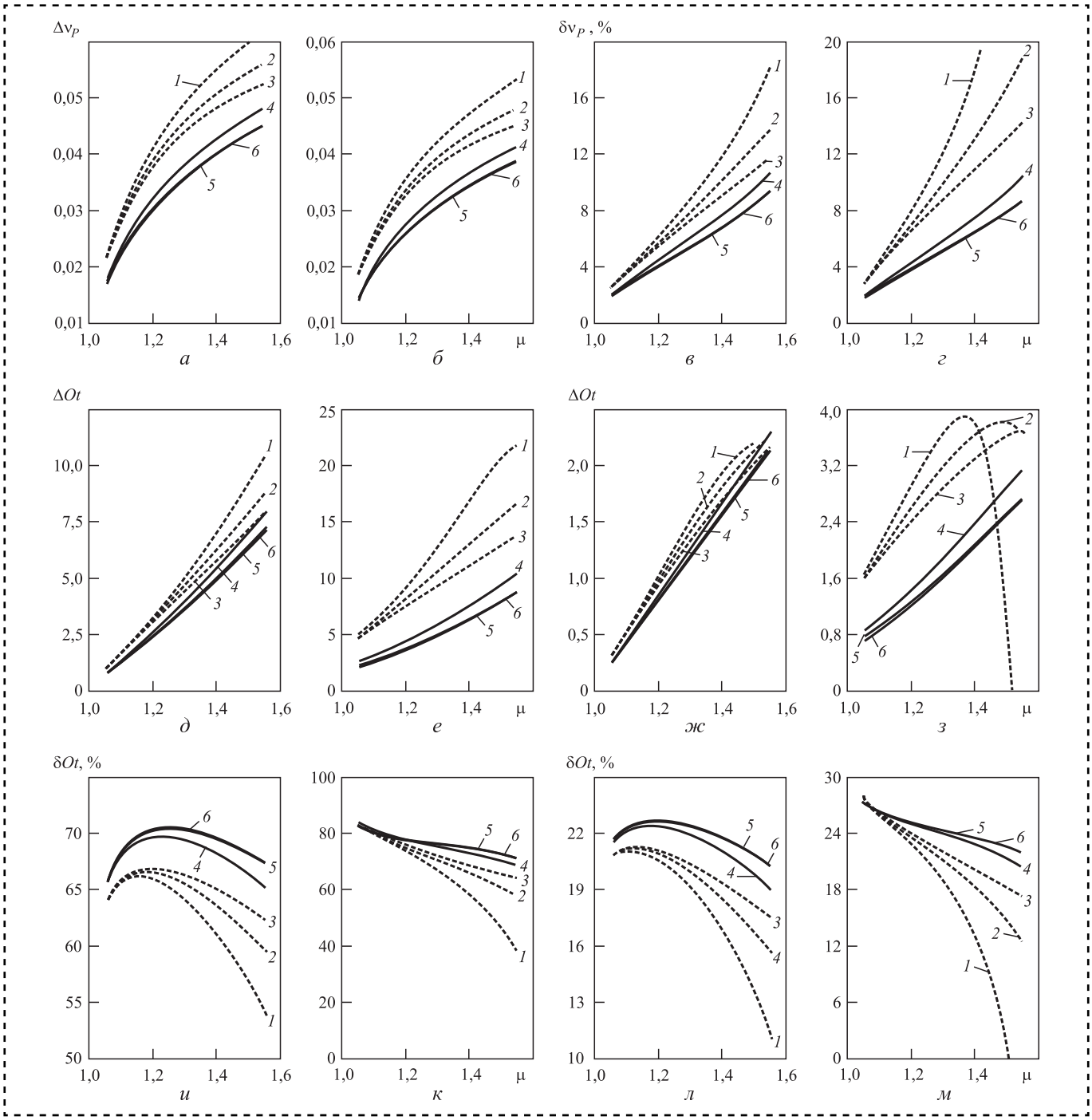


Рис. 4. Абсолютное и относительное изменение показателей ν_P (*а—г*) и *Ot* (*д—м*) в зависимости от коэффициента вытяжки:

а, *в*, *д*, *ж*, *и*, *л* — $\sigma_q = 0$; *б*, *г*, *е*, *з*, *к*, *м* — $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{S0}$; *д*, *е*, *и*, *к* — абсолютное и относительное снижение показателя *Ot* при увеличении коэффициента *f* от 0,025 до 0,05; *ж*, *з*, *л*, *м* — снижение *Ot* при увеличении коэффициента *f* от 0,05 до 0,075; остальные обозначения на рис. 2

(рис. 4, *а*) при всех моделях упрочнения. Однако относительная величина $\delta\nu_P$ для моделей (15)—(17) больше при действии противонатяжения (рис. 4, кривые *1—3*). Модуль $\Delta\nu_P = 0$ при уменьшении коэффициента трения от 0,05 до 0,025 и при его увеличении от 0,05 до 0,075. Для показателя *Ot* (рис. 4, *д—м*) разные значения ΔOt при указанных изменениях коэффициента трения. Снижение ΔOt от увеличения коэффициента *f* от 0,025 до 0,05 (рис. 4, *д*, *е*) больше, чем аналогичная величина ΔOt при росте коэффициента *f* от 0,05 до 0,075 (рис. 4, *ж*, *з*) при отсутствии и действии противонатяжения. Относительное изменение δOt больше при увеличении коэффициента *f* от 0,025 до 0,05 (рис. 4, *и*, *к*).

Абсолютное изменение ΔOt меньше при более интенсивном упрочнении (линия *6* для латуни), и больше для модели (15) с менее интенсивным упрочнением (кривые *1*). Противоположная закономерность наблюдается для относительной величины δOt (рис. 4, *и—м*), которая меньше при модели (15). С повышением коэффициента вытяжки расходятся все линии для абсолютных и относительных показателей для степени расхождения коэффициента ν_P и отношения *Ot* от изменения коэффициента трения.

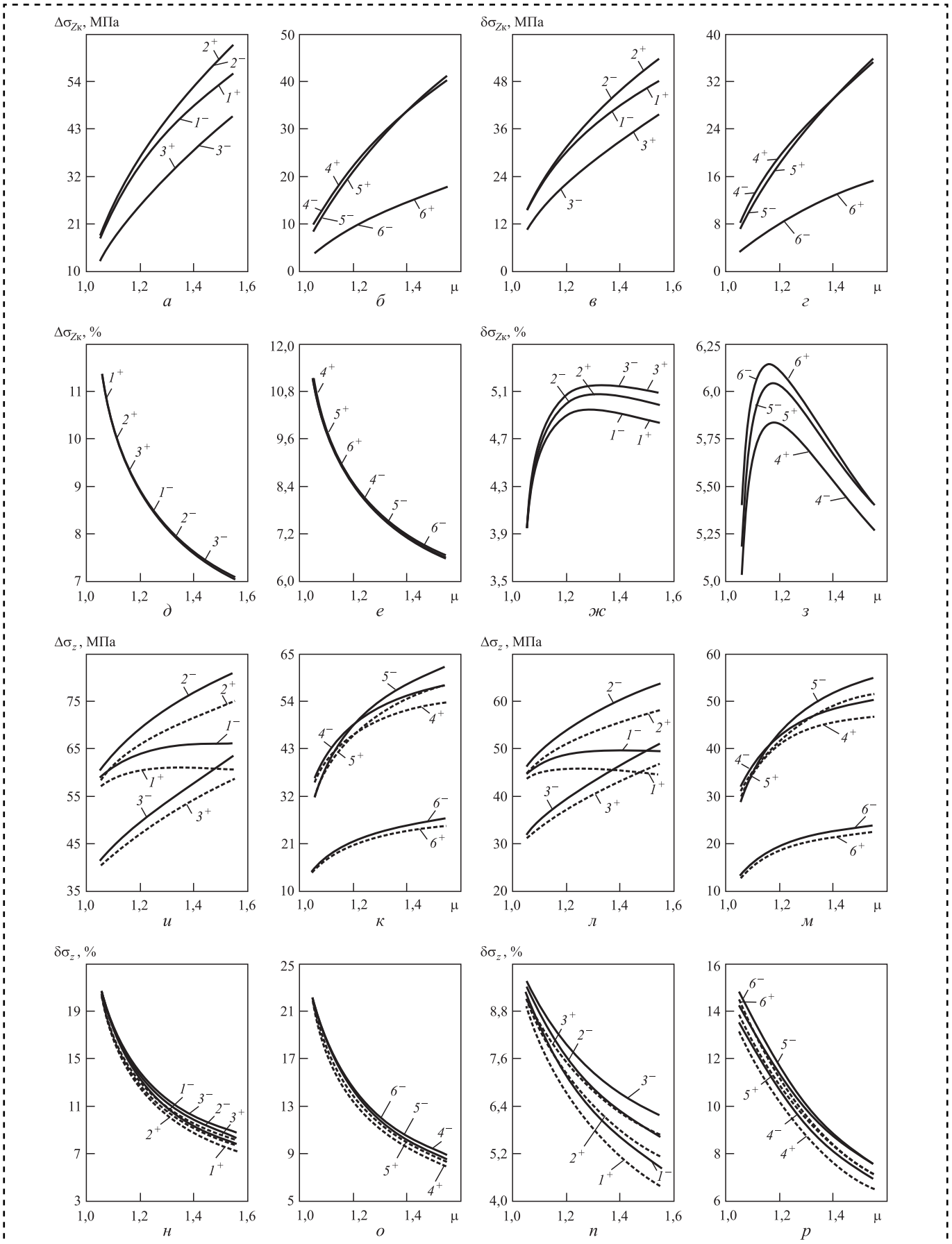
Для моделей упрочнения (15)—(20) выполнили оценку абсолютного и относительного изменения прироста $\sigma_{Zк}$ осевого напряжения в рабочем конусе и напряжения σ_Z волочения при отклонении коэффициента трения на ±0,025 от номинальной величины 0,075 при отсутствии и наличии противонатяжения (рис. 5).

Увеличение и уменьшение номинальной величины 0,075 коэффициента трения на 0,025 вызвало одинаковое изменение прироста $\sigma_{Zк}$ при отсутствии и наличии противонатяжения для всех моделей упрочнения (рис. 5, *а—г*). При этом напряжение σ_Z волочения изменилось на разную величину при росте и снижении номинального коэффициента трения 0,075 (рис. 5, *и—м*). Отклонение прироста $\Delta\sigma_{Zк}$ больше для модели (16) с исходным напряжением текучести 1000 МПа и коэффициентом *k* упрочнения 0,75 (кривые 2^- и 2^+) при отсутствии (рис. 5, *а*) и наличии (рис. 5, *в*) противонатяжения. Относительный прирост $\delta\sigma_{Zк}$ осевого напряжения в рабочем конусе при отсутствии противонатяжения одинаков для моделей (15)—(17) и для моделей (18)—(20), что отражают соответственно графики рис. 5, *д* и *е*. Величина $\delta\sigma_{Zк}$ несколько больше для моделей (15)—(17) при повышенных обжатиях (рис. 5, *д*). При действии противонатяжения $\delta\sigma_{Zк}$ существенно отличается для разных моделей упрочнения (рис. 5, *ж*, *з*). Форма линий для абсолютного изменения $\Delta\sigma_Z$ напряжения волочения отличается для разных моделей упрочнения (рис. 5, *и*, *м*). Линии для относительного изменения $\delta\sigma_Z$ напряжения волочения для разных моделей имеют одинаковую форму, особенно, при отсутствии противонатяжения (рис. 5, *н*, *о*). При отсутствии (рис. 5, *н*, *о*) и действии (рис. 5, *п*, *р*) противонатяжения наименьшая величина $\delta\sigma_Z$ для модели (15) при увеличении коэффициента трения от 0,075 до 0,10 (кривая 1^+), а наибольшее относительное изменение $\delta\sigma_Z$ для модели (20) при уменьшении коэффициента трения от 0,075 до 0,05 (кривая 6^-). Сравнение расположения соответствующих кривых для абсолютного изменения напряжений $\Delta\sigma_{Zк}$ и $\Delta\sigma_Z$ и относительного изменения $\delta\sigma_{Zк}$ и $\delta\sigma_Z$ при отсутствии и действии противонатяжения показывает его стабилизирующее действие: при отсутствии противонатяжения значения показателей $\Delta\sigma_{Zк}$ и $\Delta\sigma_Z$, $\delta\sigma_{Zк}$ и $\delta\sigma_Z$ больше, чем при его отсутствии.

На рис. 6 приведены зависимости абсолютного $\Delta\gamma$ и относительного $\delta\gamma$ изменения коэффициента запаса прочности при отклонении номинальной величины коэффициента трения 0,075 на ±0,025 при отсутствии и наличии противонатяжения.

Рис. 5. Абсолютное и относительное изменение прироста $\sigma_{Zк}$ осевого напряжения в рабочем конусе и напряжения σ_Z волочения при отклонении коэффициента трения на ±0,025 от номинальной величины 0,075:

а, *б*, *д*, *е*, *и*, *к*, *н*, *о* — $\sigma_q = 0$; *в*, *г*, *ж*, *з*, *л*, *м*, *п*, *р* — $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{S0}$; 1^-, 1^+ — модель упрочнения (15); 2^-, 2^+ — (16); 3^-, 3^+ — (17); 4^-, 4^+ — (18); 5^-, 5^+ — (19); 6^-, 6^+ — (20); "+" — изменение показателей от увеличения коэффициента трения от 0,075 до 0,10; "−" — изменение показателей при уменьшении коэффициента трения от 0,075 до 0,05


Δσ_Zк, МПа
δσ_Zк, МПа
Δσ_Zк, %
δσ_Zк, %
Δσ_z, МПа
Δσ_z, МПа
δσ_z, %
δσ_z, %
μ
а
б
в
г
д
е
ж
з
и
к
л
м
н
о
п
р

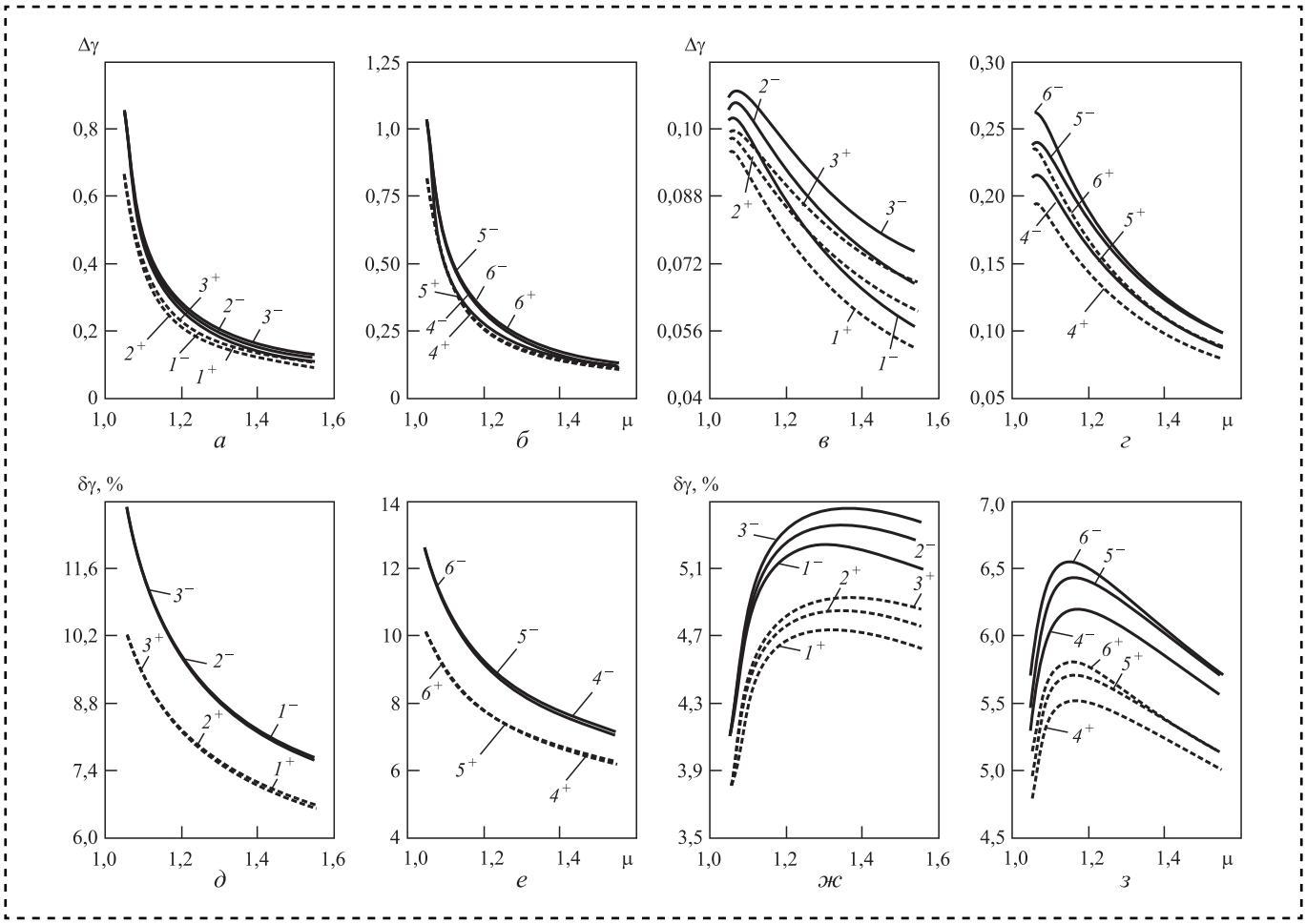


Рис. 6. Абсолютное и относительное изменение коэффициента γ запаса прочности при отклонении коэффициента трения на ±0,025 от номинальной величины 0,075:
а, *б*, *д*, *е* — $\sigma_q = 0$; *в*, *г*, *ж*, *з* — $\sigma_q = 0{,}25\sigma_{S0}$; остальные обозначения на рис. 5

Наибольшее изменение Δγ и δγ у модели (20) при уменьшении коэффициента трения от 0,075 до 0,05 при отсутствии и действии противонатяжения (кривые 6^-), а наименьшее — у модели (15) при увеличении номинального коэффициента трения до 0,10 (кривые 1^+). От действия противонатяжения также снижаются показатели Δγ и δγ для всех моделей упрочнения. При отсутствии противонатяжения относительное изменение δγ одинаковое для моделей упрочнения (15)—(17) при росте и снижении номинального значения коэффициента трения (рис. 6, *д*). Для моделей (18)—(20) имеем равенство δγ (рис. 6, *е*) при положительном отклонении коэффициента трения (кривые 4^+, 5^+ и 6^+) и отрицательном отклонении (кривые 4^-, 5^- и 6^-).

Выводы

С повышением напряжения противонатяжения, степени деформации в проходе волочения и коэффициента трения, со снижением интенсивности упрочнения материала проволоки наблюдается увеличение прироста $\sigma_{Zк}$ осевого напряжения в рабочем конусе в сравнении с приростом $\sigma_{Zп}$ этого напряжения в калибрующем пояске (увеличивается показатель *Ot*). Кривые зависимостей прироста $\sigma_{Zп}$ осевого напряжения в пояске от коэффициента вытяжки могут иметь максимальные значения. Различие прироста $\sigma_{Zп}$ осевого напряжения в пояске по упрощенной формуле С.И. Губкина и по новой формуле (10) усили-

вается с повышением обжатия в проходе волочения и напряжения противонатяжения и уменьшением интенсивности упрочнения проволоки.

За номинальные значения параметров деформации приняты значения, обеспечивающие оптимальный угол $\alpha_{опт}$ волочения. Дана оценка степени отклонения для показателей процесса волочения от их номинальных значений при положительном и отрицательном приросте коэффициента трения для разных моделей упрочнения материала проволоки в зависимости от коэффициента вытяжки. Форма кривой упрочнения влияет на показатели напряженного состояния и запаса прочности проволоки, а также на степень изменения этих показателей при отклонении коэффициента трения от номинальной величины. Противонатяжение снижает абсолютную и относительную величину отклонения осевого напряжения и коэффициента запаса прочности по И.Л. Перлину при изменении коэффициента трения, что положительно влияет на работу узлов и составляющих волочильного стана и качество протягиваемой проволоки [10, 11].

Библиографический список

1. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки: Магнитогорск: МГТУ, 2008. 358 с.
2. **Бровман М.Я.** Анализ точности формул для расчета энергосиловых параметров процесса волочения // Производство проката. 2013. № 9. С. 32—34.
3. **Гурьянов Г.Н.** Резервы экономии электроэнергии при холодном волочении стальной проволоки // Сталь. 2009. № 12. С. 53—54.
4. **Гурьянов Г.Н.** Оценка параметров волочения при разных моделях упрочнения проволочной заготовки // Сталь. 2014. № 7. С. 71—77.
5. **Гурьянов Г.Н., Платов С.И., Терентьев Д.В.** Прирост средней температуры в проходе волочения с противонатяжением при разных моделях упрочнения проволоки // Производство проката. 2015. № 9. С. 14—22.
6. **Гурьянов Г.Н.** Расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске с учетом напряженного состояния круглой заготовки на выходе рабочего конуса волоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 6. С. 34—36.
7. **Перлин И.Л., Ерманок М.З.** Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
8. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением. Екатеринбург: Изд-во УГТУ — УПИ, 2001. 836 с.
9. **Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В.** Ресурс пластичности металлов при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1984. 144 с.
10. **Гурьянов Г.Н.** Влияние величины коэффициента контактного трения на напряженное состояние и запас прочности при волочении круглого сплошного профиля // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 11. С. 27—36.
11. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Качество и технологичность волочения проволоки специального назначения // Сталь. 2013. № 3. С. 78—80.

Читайте в следующем номере:

- **Измайлов В.В., Новоселова М.В.** Трибологические свойства тонких пленок жирных кислот
- **Болдырев Д.А., Попова Л.И., Сафронов Н.Н.** О некоторых проблемах материаловедения в трибологии
- **Юнусходжаев С.Т.** Износостойкость подшипников скольжения, работающих в среде переменного нагружения
- **Иргашев А.И., Иргашев Б.А.** Оценка износа деталей агрегатов машин по содержанию продуктов износа в масле

УДК 621.787

А.В. Щедрин, *канд. техн. наук*
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана),
А.А. Кострюков *(Демиховский машиностроительный завод, г. Орехово-Зуево),*
Н.Ю. Чихачёва *(Академия проблем качества),*
А.О. Поляков *(ООО МЗ "ТОНАР", г. Орехово-Зуево),*
И.В. Косарев *(АО "НПП Респиратор", г. Орехово-Зуево),*
Н.С. Медвинская *(Московский государственный машиностроительный университет "МАМИ")*
E-mail: kaaoz@bk.ru

Технологические возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок

Проведены сравнительные исследования технологических возможностей и характеристик метода комбинированного прошивания отверстий в заготовках из нешлифуемого цветного сплава инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях самовозбуждающегося противодавления инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского". Установлены оптимальные режимы обработки.

A comparative study of technological capabilities and characteristics of the method of combined broach holes in workpieces made of non-ferrous alloy sanding tool with regular microgeometry surface in a self-excited counter-metalplacking innovative lubricants implementing fundamental scientific discovery "the effect of the friction wearlessness Garkunov—Kragelsky" are performed. The optimal treatment modes are determined.

Ключевые слова: комбинированное прошивание отверстий, противодавление металлоплакирующих смазок, усилие обработки, качество обработки.
Keywords: combined of surface broach holes, counter metalplacking lubricants, processing effort, the quality of treatment.

В работах [1, 2] исследованы технологические возможности и характеристики метода комбинированного прошивания отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности [3, 4] в условиях отсутствия принудительной подачи инновационных металлоплакирующих смазок [5, 6] в очаг деформации.

Как показывает системный анализ методов обработки [7], для дальнейшей интенсификации комбинированного воздействия на обрабатываемый материал в условиях реализации фундаментального научного открытия "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского" [5, 6] целесообразно применить технологическую схему с самовозбуждающимся противодавлением смазки [8, 9]. Для сравнительной оценки технологических возможностей и характеристик такого варианта проведены дополнительные экспериментальные исследования.

На рис. 1 представлены технологические схемы прошивания отверстий.

Схема-исполнение I реализует традиционную обработку без использования противодавления смазки. Она осуществляется с помощью опоры *1*, на торец *2* которой устанавливают образец-заготовку *3* с прошивкой *4*, рабочий элемент *5* которой упрочнен регулярным микрорельефом *6*. При этом на поверхность отверстия образца-заготовки и прошивку предварительно наносят смазку.

Схема-исполнение II реализует обработку с самобуждающимся противодавлением смазки [8, 9]. Она осуществляется с помощью обоймы *7* с внутренней полостью *8*, кото-

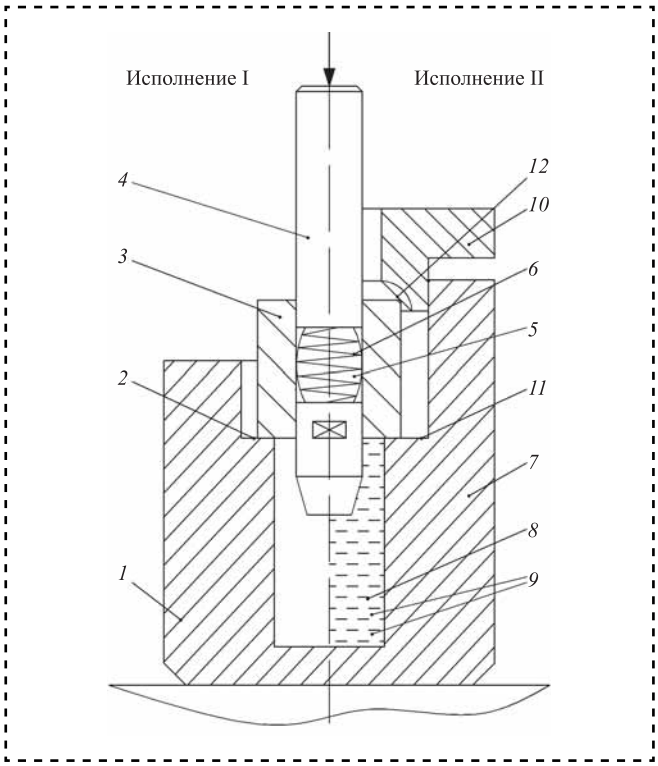


Рис. 1. Схемы прошивания отверстий

рая заполняется соответствующей смазкой *9*. Образец-заготовка *3* центрируется с помощью крышки *10* по торцу *11* и конусу *12*.

Перед прошиванием доливают смазку примерно до уровня верхнего (входного) торца образца-заготовки *3*. При движении прошивки *4* в полости *8*, а также в полости отверстия заготовки за счет сокращения объема создается противодавление смазки *9* и происходит ее истечение по канавкам микрорельефа *6* [8, 9].

В качестве экспериментальных образцов-заготовок по аналогии с работами [1, 2] использовали цилиндрические втулки из дюралюминия марки Д1Т (116 НВ) с наружным диаметром 39 мм и высотой 40 мм. Предварительная обработка отверстий образцов-заготовок — растачивание с параметром шероховатости поверхности Ra_3 = 0,77...3,7 мкм. В качестве инструмента также по аналогии с работами [1, 2] использовали сборную однозубую прошивку *4* (см. рис. 1) со сменным рабочим элементом *5* из быстрорежущей стали марки Р6М5: диаметры по калибрующей ленточке 20,13 и 20,2 мм; угол рабочего и обратного конусов 5°; ширина калибрующей ленточки 7 мм. Воздействующая поверхность рабочего элемента *5* упрочнена регулярным микрорельефом *6* в виде однозаходных винтовых канавок [7] радиусом 1,5 мм, шагом 0,5 мм и глубиной на участке калибрующей ленточки 8 мкм. Продольные профилограммы калибрующей ленточки приведены в работе [9].

Регулярный микрорельеф выполняли на универсальном токарно-винторезном станке с помощью алмазного выглаживателя.

В качестве технологической смазки для сопоставимости применяли минеральное масло марки И-40 без и с добавкой инновационной металлоплакирующей присадки "Валена" [6], реализующей "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского" [5]. Объемную долю присадки С варьировали от 0 до 20 % через интервал 10 %. Абсолютную номинальную деформацию отверстия образцов-заготовок на диаметр $i_н$ изменяли в диапазоне 0,05...0,25 мм через 0,05 мм. Скорость прошивания 0,05 м/мин.

На рис. 2 представлена зависимость удельной силы прошивания [1, 2, 4] от абсолютной фактической деформации $i_ф$ и содержания металлоплакирующей присадки при обработке без противодавления смазки (технологическая схема I на рис. 1).

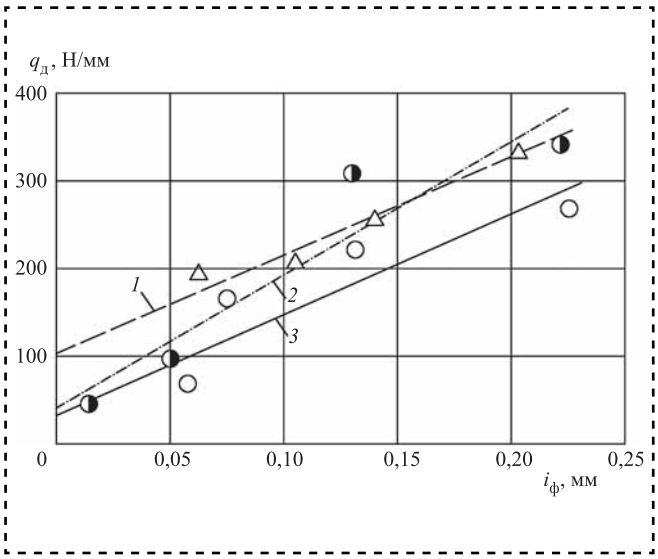


Рис. 2. Зависимость удельной силы прошивания $q_д$ от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка без противодавления смазки):
1 — *C* = 0; *2* — *C* = 10 %; *3* — *C* = 20 %

Аналитически данная зависимость аналогично [1, 2] может быть представлена в виде, Н/мм,

$$q_д\ (C = 0) = 104{,}5 + 1122{,}5 i_ф;$$
$$q_д\ (C = 10\ \%) = 39{,}7 + 1507{,}9 i_ф; \qquad (1)$$
$$q_д\ (C = 20\ \%) = 38{,}745 + 1111{,}75 i_ф.$$

Совместный анализ графической (см. рис. 2) и аналитической (1) зависимостей показывает, что по сравнению с "чистым" маслом И-40 смазка, содержащая 10 % металлоплакирующей присадки, обеспечивает снижение удельной силы прошивания в диапазоне абсолютной фактической деформации $i_ф$ до 0,168 мм, а смазка, содержащая 20 % присадки, обеспечивает энергосиловой эффект во всем диапазоне варьирования $i_ф$. Используя по аналогии с [1, 2] сравнительный критерий в виде относительного процентного уменьшения удельной силы прошивания, построили сравнительную зависимость (рис. 3), анализ которой показывает, что в диапазоне $i_ф$ = 0,05...0,15 мм при содержании присадки 10 % удельная сила прошивания может быть уменьшена на 28,3...2,56 %, а при содержании присадки 20 % в диапазоне $i_ф$ = 0,05...0,25 мм энергосиловой эффект составляет 42,5...18,29 %.

Другой эффект от применения металлоплакирующих смазок заключается в увеличении абсолютной фактической деформации $i_ф$ при равной силе (см. рис. 2) [1, 2]. Это объясняется пластифицированием деформируемого слоя отверстия поверхностно-активными компонентами металлоплакирующей смазки (эффект Ребиндера).

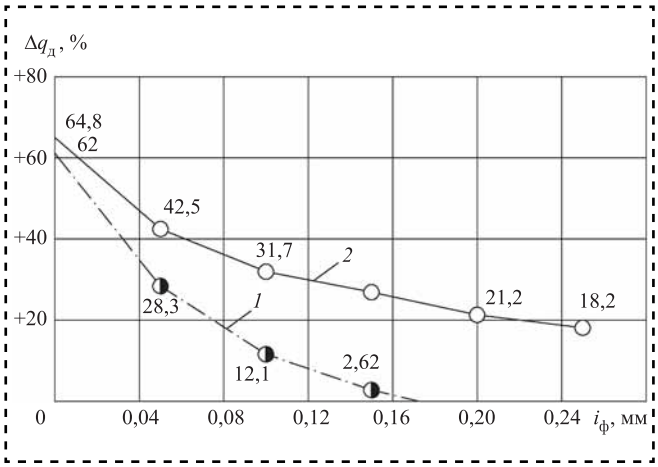


Рис. 3. Зависимость относительного процентного уменьшения удельной силы прошивания $\Delta q_д$ от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка без противодавления смазки):
1 — *C* = 10 %; *2* — *C* = 20 %

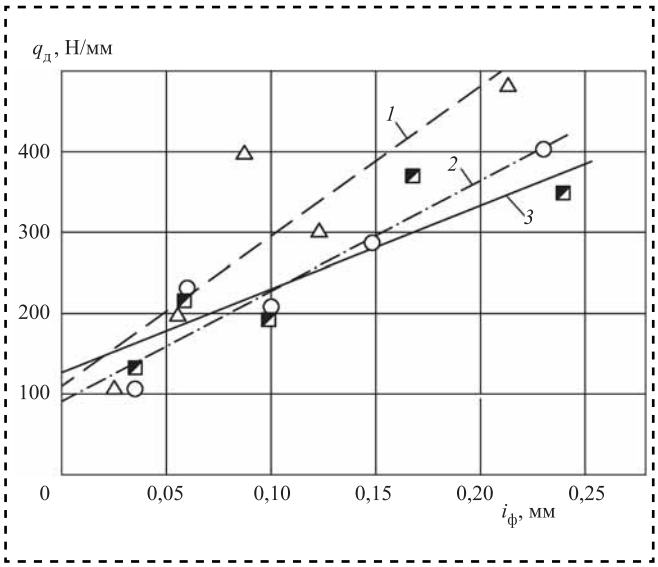


Рис. 4. Зависимость удельной силы прошивания от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка с противодавлением смазки):
1 — *C* = 0; *2* — *C* = 10 %; *3* — *C* = 20 %

На рис. 4 представлена зависимость удельной силы прошивания от абсолютной фактической деформации $i_ф$ и содержания металлоплакирующей присадки при обработке с противодавлением смазки (технологическая схема II на рис. 1). Аналитически данная зависимость может быть представлена в виде, Н/мм,

$$q_д\ (C = 0) = 112{,}92 + 1713{,}5 i_ф;$$
$$q_д\ (C = 10\ \%) = 94{,}51 + 1276{,}68 i_ф; \qquad (2)$$
$$q_д\ (C = 20\ \%) = 126{,}7 + 969{,}43 i_ф.$$

Совместный качественный и количественный анализ аналитической (2) и графической зависимостей (рис. 4, 5) свидетельствует о более существенном энергосиловом эффекте от применения металлоплакирующих смазок при их самовозбужденном противодавлении и истечении по канавкам регулярного микрорельефа воздействующей поверхности инструмента. При этом дополнительно, в отличие от обработки без противодавления (см. рис. 2, 3) [2], при наличии присадки в условиях противодавления наблюдается повсе-

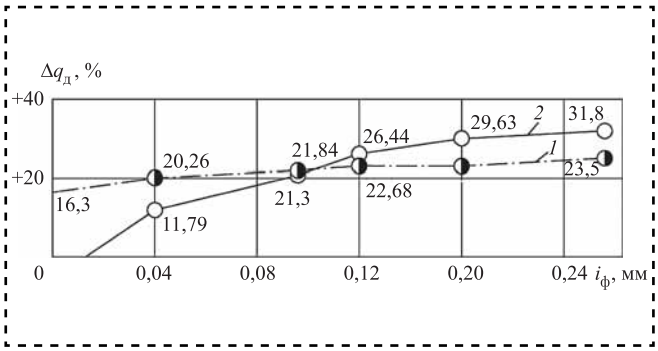


Рис. 5. Зависимость относительного процентного уменьшения удельной силы прошивания от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки (обработка с противодавлением смазки):
1 — *C* = 10 %; *2* — *C* = 20 %

местное качественное феноменальное явление в виде роста эффекта по снижению удельной силы прошивания с увеличением абсолютной фактической деформации $i_ф$ (рис. 5). Это связано с интенсификацией подачи металлоплакирующей смазки в очаг деформации на микроуровне через канавки регулярного микрорельефа, в результате чего реализуется более благоприятный режим трения, близкий к жидкостному, а также интенсифицируются образование медной сервовитной пленки [10] и проявление эффекта Ребиндера.

Другой аспект энергосилового анализа — резкое расхождение первых выражений аналитических зависимостей (1) и (2) и, наоборот, схождение вторых и третьих выражений зависимостей (1) и (2) соответственно по мере увеличения $i_ф$. Так, при содержании присадки 10 % зависимости при обработке без и с противодавлением сходятся при $i_ф$ = 0,237 мм, а при содержании присадки 20 % при $i_ф$ = 0,632 мм. Это означает существенное улучшение протекания контактных процессов в условиях противодавления металлоплакирующих смазок и исключение приведенного выше значительного энергосилового различия, которое также имеет место при применении традиционных смазок [8, 9].

На рис. 6 приведены зависимости коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности отверстия после прошивания [1, 2, 4]. Их анализ показывает, что содержание металлоплакирующей присадки и технология применения соответствующей смазки являются существенными факторами формирования шероховатости поверхности получаемых отверстий.

На рис. 7 представлены зависимости поля рассеяния диаметра отверстий $\Delta Д_д$ образцов-деталей [1, 2]. Их анализ показывает, что с увеличением степени деформации размерная точность в общем случае ухудшается

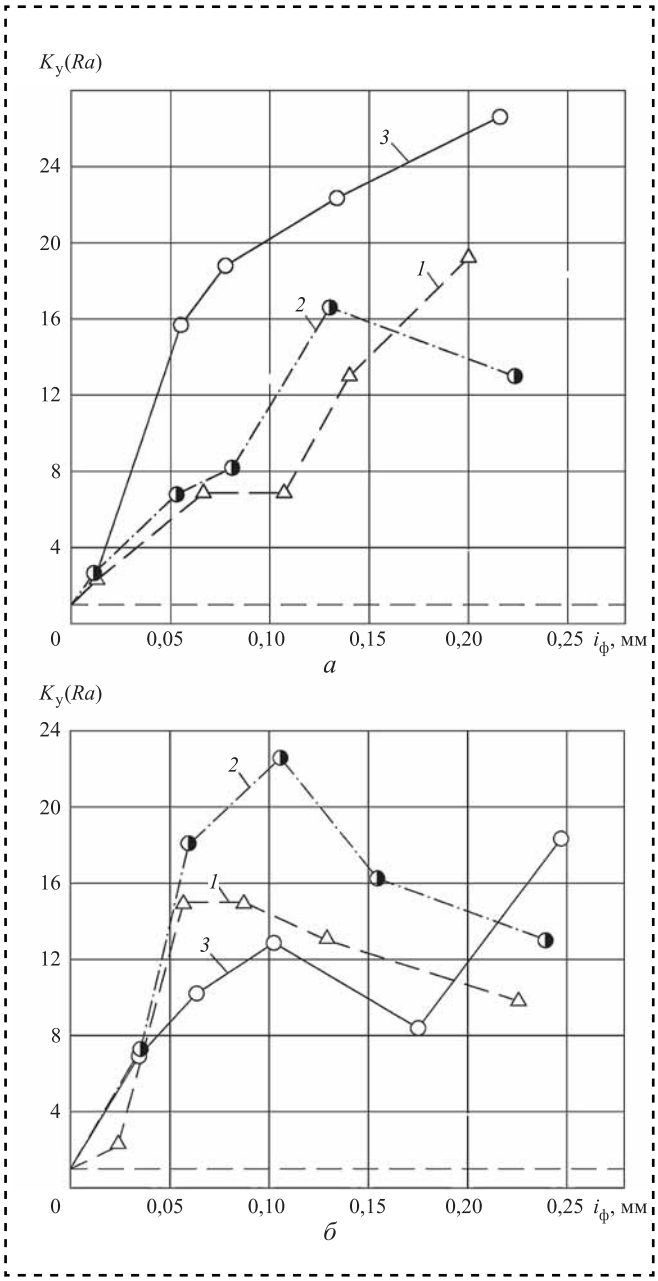


Рис. 6. Зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности отверстий образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки:
а — обработка без противодавления; *б* — обработка с противодавлением; *1* — *C* = 0; *2* — *C* = 10 %; *3* — *C* = 20 %

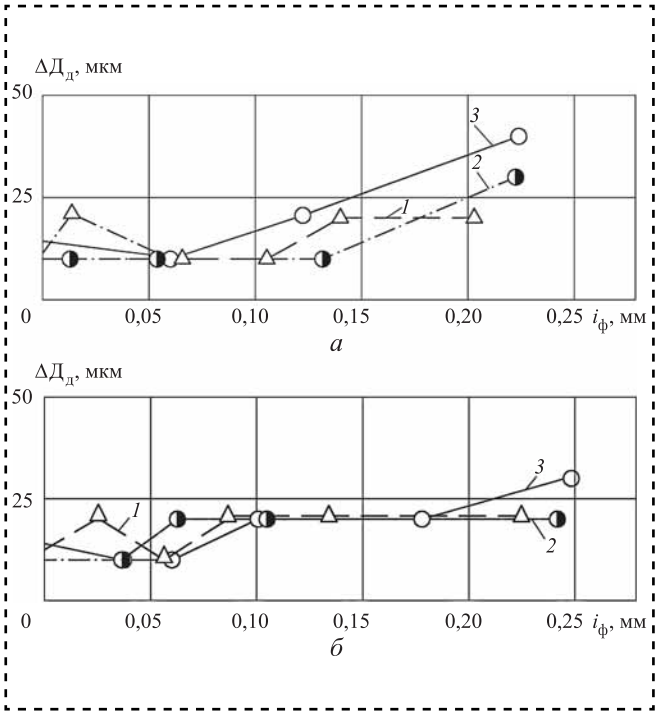


Рис. 7. Зависимость поля рассеяния диаметра отверстия образцов-деталей от абсолютной фактической деформации и содержания металлоплакирующей присадки:
а — обработка без противодавления; *б* — обработка с противодавлением; *1* — C = 0; *2* — C = 10 %; *3* — C = 20 %

(увеличивается $\Delta Д_д$). Это по аналогии с работами [1, 2, 4, 8, 9] связано с радиальной неравножесткостью образцов-заготовок по высоте вследствие действия на их опорном (выходном) торце реактивных сил трения с установочными торцами *2* и *11* приспособлений (см. рис. 1), реализующих соответствующие схемы обработки.

Однако при обработке с противодавлением металлоплакирующих смазок при $i_ф$ = 0,2 мм можно улучшить размерную точность из-за принудительной подачи (прорыва) части смазки на опорный (выходной) торец заготовки.

Другая причина более высокой размерно-геометрической точности при противодавлении и $i_ф$ > 0,2 мм — меньшие силы обработки и, соответственно, меньшие деформационные искажения отверстия.

При необходимости, используя схему-исполнение II (см. рис. 1), радиальную жесткость верхнего (входного) торца заготовки *3* можно увеличить с помощью центрирующего конуса *12* крышки *10*, путем ее нагружения через крепежные болты (на рис. 1 не показаны).

Другим элементом выполненных исследований является оценка геометрических параметров очага деформации в виде формы, знака и величины волны внеконтактной деформации. Как показывает анализ профилограмм очагов деформации, образованных рабочим конусом деформирующего элемента (рис. 8), волна имеет положительное значение и возрастает с увеличением степени деформации отверстия $i_ф$ (рис. 9). Положительная волна внеконтактной деформации при обработке существенно (до 60 %) увеличивает площадь контакта инструмента с заготовкой, затрудняет поступление технологической смазки в очаг деформации, препятствуя реализации гидродинамического режима трения.

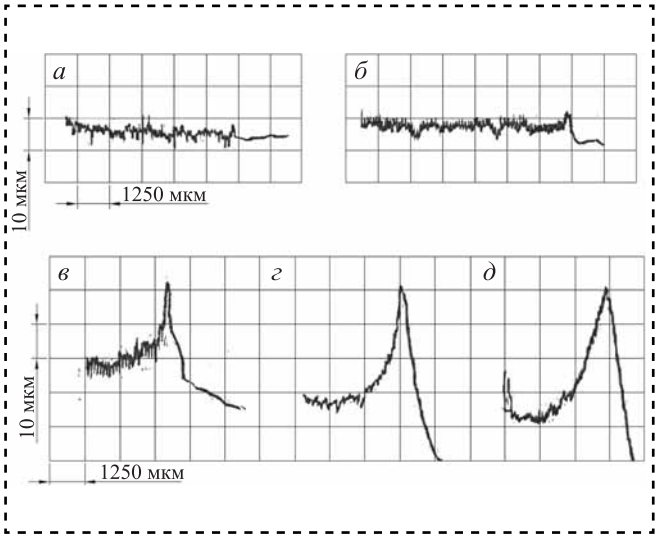


Рис. 8. Продольные профилограммы очагов деформации (обработка без противодавления смазки, C = 20 %, вертикальное увеличение 1000, горизонтальное увеличение 8):
а — $i_ф$ = 0,0534 мм; *б* — $i_ф$ = 0,1025 мм; *в* — $i_ф$ = 0,1317 мм; *г* — $i_ф$ = 0,1167 мм; *д* — $i_ф$ = 0,2575 мм

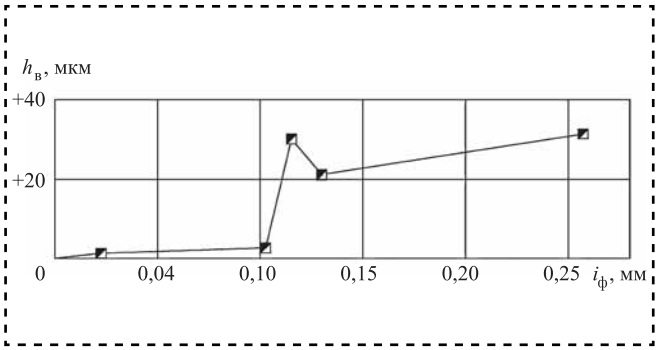


Рис. 9. Зависимость высоты волны $h_в$ внеконтактной деформации от абсолютной фактической деформации (обработка без противодавления смазки, C = 20 %)

С эксплуатационной точки зрения в положительной волне внеконтактной деформации преобладают растягивающие напряжения, возможно образование глубоких трещин, переходящих в поверхностный слой детали и снижающих ее служебное качество.

Таким образом, выполненные исследования расширяют и уточняют информационную базу для системного проектирования [7, 11, 12] инновационных методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий [1—4, 8, 9, 13].

Библиографический список

1. **Совершенствование** методов комбинированной обработки на основе применения "эффекта безызносности" / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2011. № 16. С. 25—29.
2. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А.** Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 76—79.
3. **Щедрин А.В., Таненгольц А.Б.** Совершенствование характеристик инструмента для деформирующе-выглаживающего прошивания отверстий // Машиностроитель. 2002. № 11. С. 20—23.
4. **Повышение** эффективности комбинированной обработки отверстий на основе регуляризации микрогеометрии поверхности рабочих элементов инструмента / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 6. С. 14—19.
5. **Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В.** Эффект избирательного переноса при трении (эффект безызносности). Диплом № 41 // Открытия в СССР 1957—1967 гг. М.: ЦНИИПИ, 1969. С. 52, 53.
6. **Пат. 2277579 РФ, МПК 7: С 10 М 141/06**. Металлосодержащая маслорастворимая композиция для смазочных материалов.
7. **Трибология** как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов / А.В. Щедрин и др. // Ремонт, восстановление, модернизация 2009. № 4. С. 15—20.
8. **Совершенствование** технологий применения смазывающе-охлаждающих технологических сред в комбинированных методах обработки проката / А.В. Щедрин и др. // Машиностроитель. 2007. № 6. С. 35—37.
9. **Комплексное** исследование эффективности комбинированной прошивки отверстий с противодавлением технологической смазки / А.В. Щедрин и др. // Технология машиностроения. 2009. № 9. С. 17—20.
10. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю.** Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3. С. 8—12.
11. **Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачёва Н.Ю.** Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20—26.
12. **Ярославцев В.М.** Разработка методологии поиска новых методов обработки и ее практическая реализация // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2007. № 2. С. 56—70.
13. **Щедрин А.В., Поляков А.О.** Влияние металлоплакирующих смазочных материалов на процесс комбинированного прошивания отверстий // Вестник машиностроения. 2015. № 4. С. 71—75.

УДК 621.396.6

Ю.В. Иванов, *д-р техн. наук,* **А.Е. Курносенко** *(МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: yvivanov@bmstu.ru

Основные задачи, решаемые программным комплексом "Контур" компьютерного проектирования роботизированных средств ГАСК сборки электронной аппаратуры в условиях многономенклатурного производства

Рассмотрена методика многоэтапного компьютерного проектирования структур гибких роботизированных комплексов для сборки (ГАСК) электронных модулей на базе печатных плат и навесных электронных компонентов в многономенклатурном производстве. Проведена оценка эффективности структур таких комплексов в сравнении с ручной сборкой и с применением комплекта оборудования. Показано преимущество комплексов, спроектированных в соответствии с предлагаемой методикой.

Method of multi-stage computer-aided design of flexible manufacturing work cell for high mix PCB assembly is described. Performance evaluation of these work cells is done compared with manual assembly and set of stand-alone equipment. The advantages of work cells designed by this method are demonstrated.

Ключевые слова: гибкий автоматизированный сборочный комплекс, гибкое многономенклатурное производство, автоматизация производства, электронный модуль на печатной плате, электронный компонент, производственный участок.

Keywords: work cell, flexible high mix manufacturing, manufacturing automation, printed circuit board, electronic component, electronic assembly, production floor.

В автоматизации производства электронной аппаратуры (ЭА) можно выделить два основных направления: автоматизация с применением традиционных средств и автоматизация с применением средств гибкой автоматизации.

Первое направление использует традиционные средства (автоматические линии на основе специальных автоматов с механическими и электромеханическими устройствами). Традиционные средства обладают высокой производительностью, но имеют малую универсальность, малую надежность и не обладают программной переналадкой. Их нельзя использовать в многономенклатурном производстве ЭА.

Второе направление автоматизации производства ЭА — гибкое автоматизированное производство, способное программно перестраиваться на выпуск новых типов ЭА. Средствами сборки этой автоматизации являются сборочные центры, промышленные роботы, технологические автоматы, которые с использованием транспортных и накопительных средств объединяются в комплексы, управляемые автоматизированными системами управления (АСУ). При частой сменяемости изделий ЭА, расширении номенклатуры ее выпуска, сокращении сроков освоения средства автоматизации должны иметь широкую универсальность, способность к быстрой программной переналадке (быть гибкими), быть унифицированными, построенными по модульному принципу. В многономенклатурном серийном производстве ЭА наиболее перспективны роботизированные комплексы (РК) сборки. Однако развитие их сдержива-

ется рядом факторов: неподготовленностью изделий к сборке в РК, отсутствием научных основ проектирования и эксплуатации РК (несовершенством технологических, транспортных операций; необоснованностью выбора оснастки, оборудования; нерациональностью объединения их в комплексы, отсутствием учета вероятностного характера сборки в РК, отсутствием программного обеспечения проектирования РК и др.).

Цель работы — частично решить проблемы проектирования структур РК сборки электронных модулей (ЭМ) на базе печатных плат и навесных электронных компонентов в многономенклатурном производстве, имеющих наибольший удельный вес в аппаратуре ЭА.

Проблеме проектирования гибких автоматизированных комплексов посвящены работы в машиностроении — Р.К. Горанского, Н.М. Капустина, Л.Ю. Лищинского, В.А. Митрофанова, В.Г. Серебрянного, В.Д. Цветкова и др.; в приборостроении, радиоэлектронной и электронно-вычислительной технике — П.И. Буловского, М.С. Лапина, Н.П. Меткина, И.П. Норенкова и др.

Традиционное проектирование структур автоматизированных сборочных комплексов (АСбК) носит субъективный характер. Оно недостаточно учитывает взаимосвязи между отдельными элементами АСбК, особенности изделий ЭМ, оборудования (АТО), оснастки (СТО), вероятностный характер сборки, номенклатуру ЭМ, необходимость обеспечения гарантии пайки выводов электронных компонентов (ЭК) перед сборкой; вспомогательные операции по упаковке и переупаковке ЭК, фактическую загрузку АТО, готовность АТО к работе, выход с него годных изделий ЭМ и др.

Процесс проектирования АСбК, как правило, не автоматизирован и не оптимален (например, не оптимизирована последовательность монтажа компонентов ЭК на плату). При автоматизированном проектировании разработка технологических процессов (ТП) и структур сборочных комплексов выполняется методами адресации и традиционного синтеза. Метод адресации не предполагает проектирования нового ТП. Применение методов традиционного синтеза (с использованием индивидуального оптимизирующего метода) позволяет получить один новый ТП с последующей его оптимизацией по одному критерию. Этого недостаточно, сложно из-за трудности формализации и приводит к малоэффективным или ошибочным решениям.

Методология должна обеспечить автоматизированное, многовариантное с параметрической и структурной оптимизацией проектирование структур комплексов РК и их элементов, с разработкой на каждый новый тип изделий ЭМ индивидуального ТП, с комплексной оценкой принимаемых решений, с выполнением оптимизации запуска изделий в производство.

Существующие подходы в проектировании структур АСбК не соответствуют этим требованиям.

Рассмотрим методологию компьютерного проектирования структур ГАСК сборки ЭМ в многономенклатурном производстве ЭА, реализованную в программном комплексе (ПК) "Контур" и удовлетворяющую указанным требованиям (разработан в МГТУ им. Н.Э. Баумана, кафедра ИУ-4) [1—10].

ПК "Контур" предназначен для компьютерного проектирования структур РК ГАСК сборки ЭМ в многономенклатурном серийном производстве. "Контур" позволяет в пакетном режиме проектировать: автоматизированные ТП сборки ЭМ из однотипных ЭК и на их основе — подструктуры ГАСК; автоматизированные ТП сборки ЭМ из разнотипных ЭК и на их основе — структуры ГАСК; элементы ТП (технологические переходы, операции сборки). Пример структур ГАСК приведен на рис. 1.

При разработке элементов ТП происходит выбор/разработка специального технологического оснащения, технологических автоматов, промышленных роботов; расчет их характеристик, выбор лучшего по комплексному показателю эффективности; разработка транспортных операций.

При проектировании технологических переходов и операций выполняется параметрическая оптимизация (очередность монтажа) и структурная оптимизация (интеграция монтажа компонентов на одном рабочем месте), учитываются ограничения по затратам, точности и надежности. Проектируют транспортные

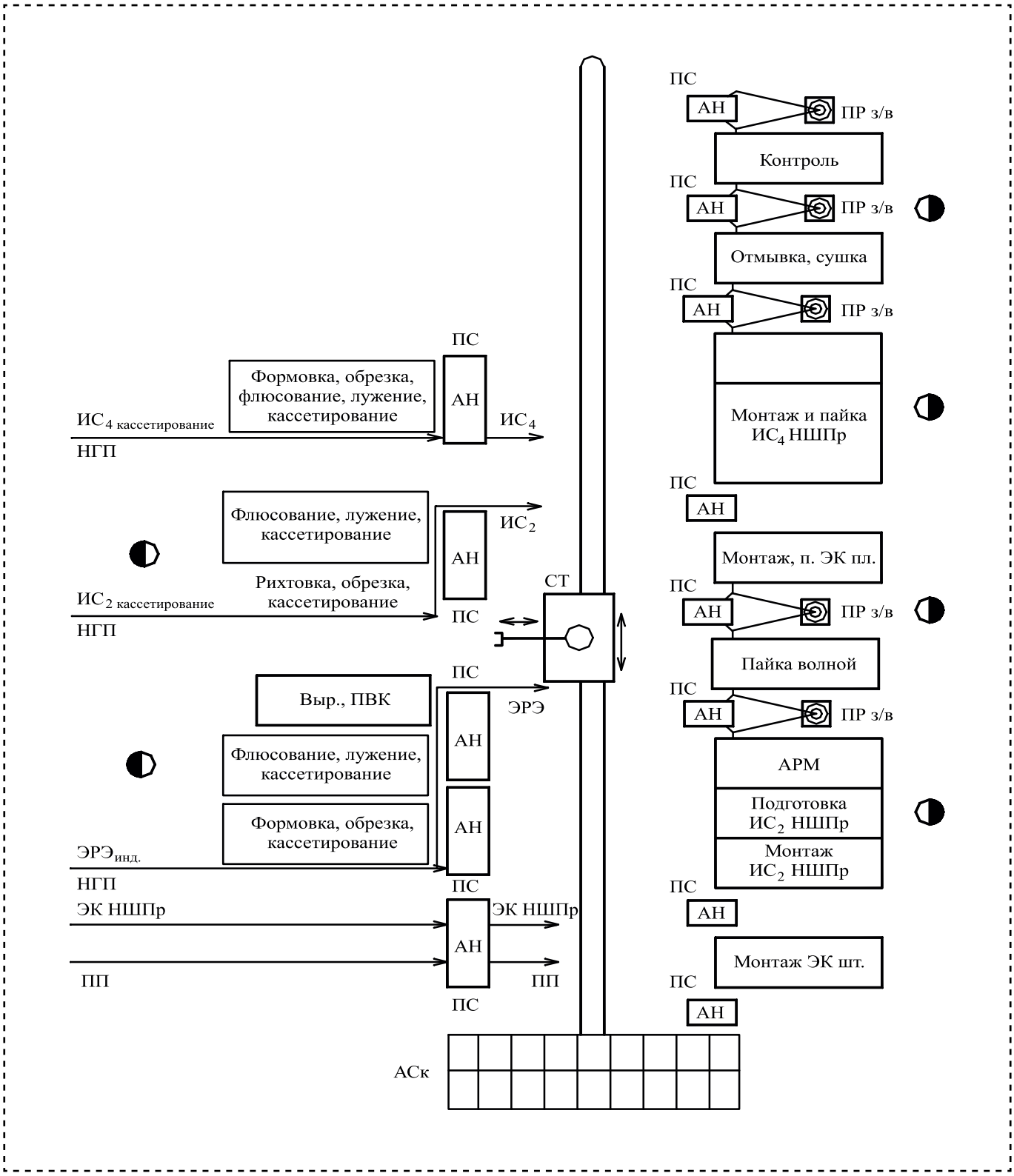


Рис. 1. Пример унифицированной структуры ГАСК сборки ЭМ на базе микросхем $ИС_2$, $ИС_4$, ЭРЭ и компонентов неширокого применения ЭК:

ПП — печатная плата; $ИС_2$, $ИС_4$ — интегральные микросхемы со штырьковыми и планарными выводами; ЭРЭ — электрорадиоэлементы; ГП — выводы ЭК с гарантией пайки; НГП — выводы ЭК без гарантии пайки; ПВК — программное вклеивание в ленту ЭРЭ разных размеров и номиналов; ПС — приемный стол; АН — автоматизированный накопитель ПП, ЭМ; ПР — промышленный робот; СТ — самоходная транспортная тележка с ПР; АСк — автоматизированный склад; АРМ — автоматизированное рабочее место

операции с учетом вероятностного характера сборки ЭМ. Проектирование структур ГАСК является сложной, трудоемкой задачей с высокой размерностью (число вариантов при трехэтапном проектировании линейно зависит от числа входных параметров; при одноэтапном — зависимость степенная). При одноэтапном проектировании число рассматриваемых вариантов велико (из-за многократного включения в структуры неоптимальных вариантов операций, АТО, СТО). Для проектирования и оптимизации требуются большие вычислительные ресурсы. При трехэтапном проектировании число вариантов резко уменьшилось, так как отсев неоптимальных вариантов начинается с первого этапа. Это позволяет использовать для оптимального проектирования структур и их элементов метод полного перебора.

На начальном этапе (рис. 2) проектируют оптимальные технологические операции (АТОп) сборки ЭМ из однотипных компонентов с максимальной концентрацией однотипных переходов (КОП) и оптимизацией очередности установки ЭК. Так как ТП сборки ЭМ состоит из набора АТОп, каждая из которых, в свою очередь, включает набор технологических переходов, то целесообразно принять за нижний уровень проектирования структур (первый этап) — уровень технологического перехода (для каждого компонента ЭК). Реализация перехода (например, монтажа компонента ЭК на плату) возможна при наличии определенных СТО, АТО, параметров и режимов их работы. Это позволяет на уровне АТОп объединить однотипные переходы с максимальной концентрацией на одном рабочем месте, а также оптимизировать последовательность их монтажа. Невозможность рассмотрения набора переходов в отрыве от объединяющей их операции диктует необходимость проектирования переходов и соответствующих им АТОп КОП в рамках одного уровня. Общность АТОп КОП сборки ЭМ на основе однотипных ЭК позволяет использовать набор унифицированных решений для их построения (благодаря общности применяемого АТО и СТО). Это уменьшает круг решений, подлежащих рассмотрению при проектировании каждого перехода и операции.

Следующим уровнем должен стать этап проектирования структур ГАСК (на основе ТП). Переход от проектирования операций сборки ЭМ из однотипных ЭК к проектированию сборки ЭМ из разнотипных ЭК целесообразно выполнить через введение промежуточного уровня, реализующего $ТП_1$ сборки ЭМ из однотипных ЭК и на его основе — проектирование подструктур (второй этап). Наличие этого уровня позволит корректно учесть применение многооперационного АТО и исключить из рассмотрения на заключительном этапе проектирования множество заведомо неоптимальных переходов и операций. Это снизит высокую размерность решаемых задач проектирования и упростит моделирование.

Заключительный уровень проектирования (третий этап) необходим не только для построения структуры ГАСК на основе АТОп с максимальной КОП, но и операций с концентрацией разнотипных переходов (КРП). Сюда целесообразно также вынести решение таких задач, как разработка транспортных операций и компоновка АТО, так как они требуют более полной информации о структуре ГАСК, его составе и параметрах.

Есть еще предварительный этап, который непосредственно в проектировании структур не участвует, но необходим для создания базы данных (БД), шаблонов и начальных моделей объектов проектирования. Условно к нему можно отнести разработку и формализацию методов проектирования ГАСК (синтеза; технико-экономической оценки; оценки и обеспечения точности, надежности, производительности и стоимости), методик и программ компьютерного проектирования структур и их элементов, групповых ТП, унифицированных структур ГАСК, тестирование АТО и СТО на возможность использования в ГАСК.

Для уменьшения трудоемкости вычислений, понижения размерности решаемых задач, а также более корректного сравнения эффективности одно- и многооперационных технологических автоматов проектирование должно быть трехэтапным. На рис. 2 показан укрупненный алгоритм проектирования структур ГАСК, где учтены оба вида проектирования (левая ветвь — пакетный режим, правая — ручной режим). Пакетный режим предназна-

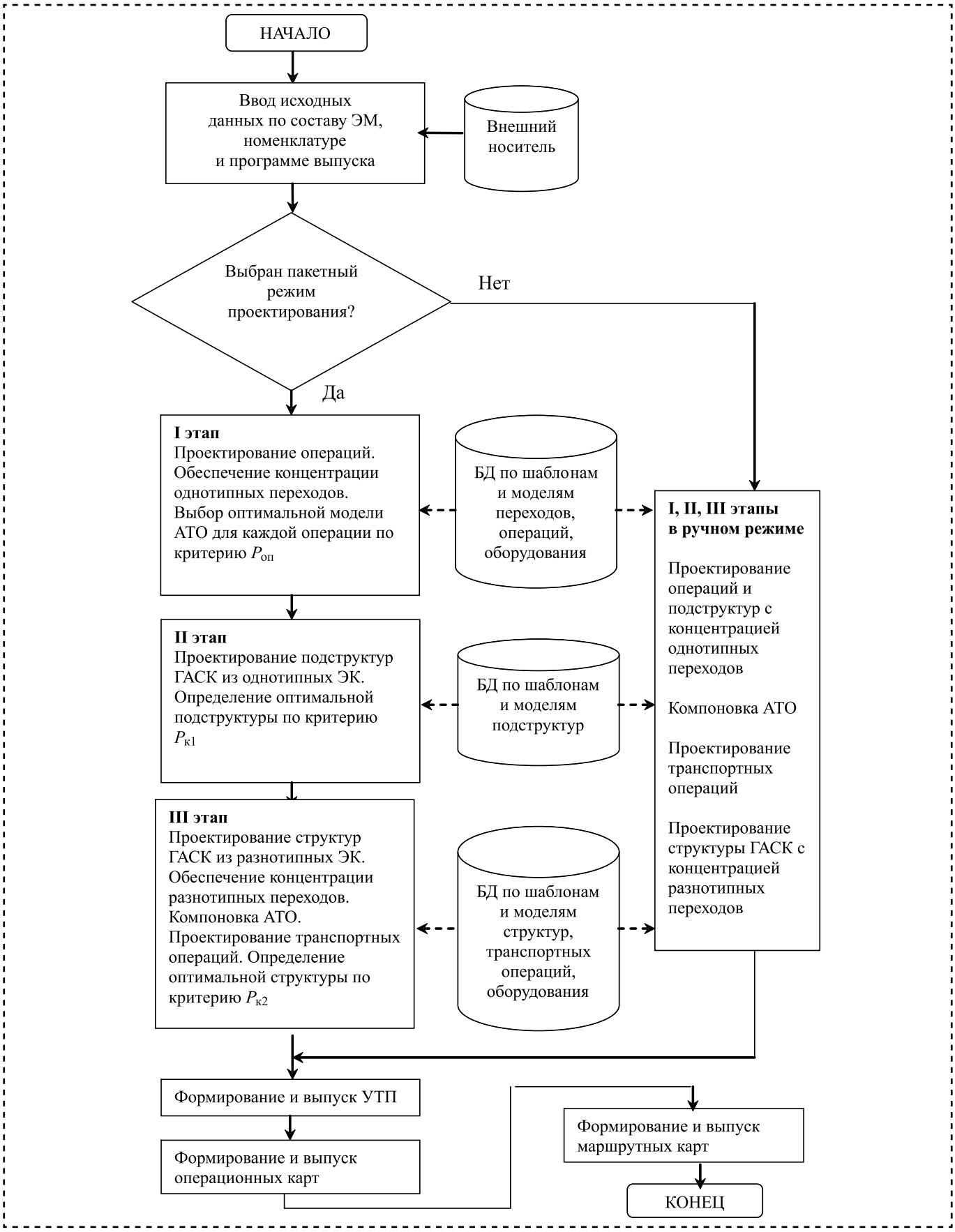


Рис. 2. Общий алгоритм автоматизированного проектирования структур ГАСК

чен для автоматизированного проектирования РК ГАСК в новом производстве. При проектировании ГАСК для существующего производства (ручной режим) разработчик может предложить использовать в качестве кандидатов имеющееся в цехе АТО. САПР ГАСК определит эффективность вариантов (при неудовлетворительном результате предложит пути модернизации АТО). Подробнее остановимся на проектировании структур ГАСК для нового производства.

Компьютерное проектирование структур ГАСК выполнено с помощью моделей разрабатываемых объектов и объектов-участников.

К разрабатываемым объектам относятся: переходы, операции (технологические, транспортные), технологические процессы ($ТП_1$, ТП), технологическая оснастка, подструктуры и структуры. Подструктуры реализуют ТП (от подготовки до контроля) сборки ЭМ из однотипных компонентов ($ТП_1$). Структуры реализуют ТП (от подготовки до контроля) сборки ЭМ из разнотипных компонентов (ТП).

Объектами-участниками являются: собираемые изделия, их элементы (электронные модули, электронные компоненты, печатные платы), технологическое АТО, транспортное АТр и накопительное АНп оборудование.

Объекты представлены в виде признаков, множества которых образуют шаблоны и модели. Шаблоны описывают унифицированный объект, модели — индивидуальный объект. Шаблоны и начальные модели находятся в БД САПР. Они разработаны до начала процесса проектирования. Полные модели объектов получаются в результате проектирования структур ГАСК.

Основные положения САПР РК ГАСК:

1) производство ЭМ — многономенклатурное, организованное (с заранее известным положением компонентов), с учетом вероятностного характера процесса сборки ЭМ в ГАСК, номенклатуры, программы выпуска, вида запуска, незавершенного производства;

2) изделия адаптированы к условиям сборки в ГАСК (ЭМ выполнены на основе ПП и навесного монтажа ЭК);

3) сборка дифференцирована по типам ЭК, которые установлены на плате без радиаторов и прокладок; сборка — последовательная с программно-координатной установкой очередного ЭК;

4) ТП сборки ЭМ в ГАСК — автоматизированный, индивидуальный, построен оптимально (с наибольшим значением комплексного показателя эффективности);

5) АТОп оптимальны (с наибольшим значением комплексного показателя эффективности, с максимальной интеграцией и оптимальной очередностью монтажа компонентов на плате);

6) ключевая операция — монтажная (так как от нее зависят подготовительные операции и пайка);

7) оборудование — автоматическое, серийное, удовлетворяющее требованиям ГАСК (технологическое — по назначению, точности, надежности, производительности, затратам; транспортное — по точности, надежности, с произвольным выбором адресата и возможностью программного изменения траектории движения);

8) управление — АСУ с иерархической структурой локальной сети;

9) проектирование структур ГАСК — компьютерное, многовариантное, трехэтапное с параметрической и структурной оптимизацией.

В соответствии с рассмотренным алгоритмом компьютерного проектирования структур ГАСК сборки ЭМ рассмотрим этапы проектирования (на уровне постановки задач). Постановка задач проектирования этапа содержит: математическую запись задач, ограничения, применяемые методы проектирования, оптимизации и критерии оптимизации, а также входные данные и результаты проектирования этапа. В математической записи слева указывается цель, справа — за счет чего она достигается.

На первом этапе компьютерного проектирования структур ГАСК проектируют операции с концентрацией однотипных переходов и оптимизацией последовательности монтажа ЭК.

Входными данными этапа являются (сформированные на предварительном этапе): множества шаблонов переходов, операций, видов и типов СТО, групп и типов ЭК; моделей ЭК, ПП, ЭМ, АТО; методы синтеза, технико-эко-

номической оценки, определения и обеспечения точности, надежности, производительности, стоимости структур ГАСК и их компонентов.

Постановка задачи компьютерного проектирования операций сборки ЭМ из однотипных ЭК:

$$\left(\tilde{O}_{i\,\text{опт}}^{(p)}, T_{i\,\text{опт}}^{(p)}, \left\{C_{imkn}^{(p)}\left(T_{i\,\text{опт}}^{(p)}\right)\right\}\right) =$$

$$= \arg\max\left[P_{\text{оп}}\left(\tilde{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}, \left\{C_{imkn}^{(p)}\left(T_{i\,\text{опт}}^{(p)}\right)\right\}\right)\right];$$

ограничения на затраты

$$C_{\text{гоп}}\left(\tilde{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}\right) \leqslant \left[C_{\text{гоп}}\right]_O;$$

$$K_{\text{гоп}}\left(\tilde{O}_{iv}^{(p)}, T_{iv}^{(p)}\right) \leqslant \left[K_{\text{гоп}}\right]_O;$$

ограничения на точность, силу, надежность СТО

$$\delta_{\text{СТО}}\left(C_{imkn}^{(p)}\right) \leqslant \left[\delta_{\text{СТО}}\right];\ F_y\left(C_{imkn}^{(p)}\right) \geqslant \left[F_y\right];$$

$$P\left(t_{\text{бр}}\right)\left(C_{imkn}^{(p)}\right) \geqslant \left[P\left(t_{\text{бр}}\right)\right];\ T_{\text{ср}}\left(C_{imkn}^{(p)}\right) \geqslant \left[T_{\text{ср}}\right];$$

ограничения на точность, надежность АТО

$$\delta_c\left(T_{ivl}^{\prime(p)}\right) \leqslant \left[\delta_c\right],\ T_{\text{ср.АТО}}\left(T_{ivl}^{\prime\prime(p)}\right) \geqslant \left[T_{\text{ср.АТО}}\right];$$

$$P_{\text{АТО}}\left(t_{\text{бр}}\right)\left(T_{ivl}^{\prime\prime(p)}\right) \geqslant \left[P_{\text{АТО}}\left(t_{\text{бр}}\right)\right],$$

где $\tilde{O}_{iv}^{(p)}$, $T_{iv}^{(p)}$, $C_{imkn}^{(p)}$ — модели операций, оборудования, оснастки.

На **первом этапе** выполняют: формирование множеств переходов, операций АТОп КОП для ЭК каждого типа; назначение на каждую операцию (переход) АТО, СТО; оптимизацию последовательности монтажа однотипных ЭК; оптимальный выбор АТО по обобщенному показателю эффективности операции $P_{\text{оп}}$ (метод оптимизации — полный перебор множества моделей АТО; ограничения — обеспечение максимальной концентрации однотипных переходов на одном рабочем месте, объемы допустимых суммарных переменных и постоянных затрат на операцию C_Σ, K_Σ); формирование блоков управляющих программ (УТП), информации для операционных карт.

Для проверки соответствия АТО требованиям ГАСК имеются процедуры условного деления АТО на функциональные устройства (например, монтажные головки, накопители компонентов, координатные системы и др.) и устройства их тестирования. По запросу от проектируемой операции выполняется оценка параметров точности, надежности, производительности, стоимости. В зависимости от результатов тестирования проводится отбор АТО (для существующего производства возможна модернизация АТО), выбор или проектирование СТО.

Оптимизация последовательности монтажа однотипных ЭК выполнена по критерию минимального суммарного холостого хода координатной системы (КС) $L_{\Sigma\text{КС мин}}$ (для решения задачи использован метод многоугольника при учете ограничений).

Выходная информация этапа — множество оптимальных операций сборки ЭМ из однотипных ЭК (АТОп КОП); блоки управляющей информации УТП и информация для операционных карт.

Второй этап — компьютерное проектирование подструктур ГАСК на основе групповых ТП сборки ЭМ из однотипных ЭК.

Входные данные этапа: множество оптимальных АТОп КОП (с первого этапа); множество шаблонов подструктур ГАСК, групповые ТП сборки ЭМ из однотипных ЭК (из БД).

Постановка задачи синтеза подструктур $\tilde{G}_y^{(p)}$ ГАСК:

$$\tilde{G}_{y\,\text{опт}}^{(p)} = \arg\max\left[P_{\text{к1}}\left(\tilde{G}_y^{(p)}, \tilde{O}_{yj\,\text{опт}}^{(p)}\right)\right];\ \tilde{O}_{yj}^{(p)} \in \tilde{O}_{i\,\text{опт}}^{(p)};$$

ограничения на затраты

$$C_\Sigma\left(G_y^{(p)}\right) \leqslant \left[C_\Sigma\right]_G;\ K_\Sigma\left(G_y^{(p)}\right) \leqslant \left[K_\Sigma\right]_G,$$

где $\left[C_\Sigma\right]_G$ и $\left[K_\Sigma\right]_G$ — допустимые по подструктуре годовые суммарные переменные и постоянные производственные затраты.

В решении задачи формирования множества подструктур ГАСК для каждого типа ЭК в соответствии с алгоритмом выполняется формирование групповых ТП [1]; расчет обобщенного показателя эффективности подструктур $P_{\text{к1}}$ для каждой подструктуры, ранжирование подструктур по $P_{\text{к1}}$ и последующий

оптимальный выбор подструктуры по критерию $P_{к1\ max}$ (метод оптимизации — полный перебор вариантов подструктур; ограничения — объемы допустимых суммарных переменных и постоянных затрат на подструктуру).

Выходная информация этапа — спроектированное множество оптимальных подструктур сборки ЭМ из однотипных ЭК (на основе $ТП_1$).

Третий этап — компьютерное проектирование структур ГАСК сборки ЭМ из разнотипных ЭК с концентрацией разнотипных переходов, разработкой компоновки АТО, транспортных операций на основе системы массового обслуживания (СМО), множества структур ГАСК и выбор из него оптимальной (по $P_{к2\ max}$). Постановка задачи синтеза собственно структур ГАСК:

$$\left(R_{g\,опт}, \tilde{N}_{g\,опт}\right) = \\ = \arg\max\left[P_{к2}\left(R_g, \left\{\tilde{O}_{z\,опт}\right\}, \left\{\tilde{G}^{(p)}_{y\,опт}\right\}, \tilde{N}_g, \left\{\tilde{P}^{mp}_{gq\,опт}\right\}\right)\right];$$

ограничения на затраты по структуре:

$$C_\Sigma\left(R_g\right) \leqslant \left[C_\Sigma\right]_R;\ K_\Sigma\left(R_g\right) \leqslant \left[K_\Sigma\right]_R;$$

ограничения на работоспособность ГАСК:

$$P_{ГАСК}(T)\left(\widehat{R}_g\right) \geqslant \left[P_{ГАСК}(T)\right];$$

$$T_{ср.ГАСК}\left(\widehat{R}_g\right) \geqslant \left[T_{ср.ГАСК}\right],$$

где $C_\Sigma\left(R_g\right)$, $K_\Sigma\left(R_g\right)$ — годовые суммарные переменные и постоянные производственные затраты на комплекс ГАСК.

Входные данные этапа: множество оптимальных АТОп (с первого этапа), множество оптимальных подструктур ГАСК сборки ЭМ из однотипных ЭК (со второго этапа) и множество шаблонов структур ГАСК сборки ЭМ (из БД). На данном этапе решены следующие задачи: разработка АТОп КРП и оптимизация очередности монтажа; формирование множества структур ГАСК с КРП; вариантов компоновки АТО (на основе шаблонов унифицированных структур); проектирование транспортных операций с учетом компоновки АТО, вероятности сборки; определение количества и марки АТр, автоматических накопителей (АН).

Компьютерное проектирование транспортных операций выполнено с учетом требуемого уровня загрузки АТО, вероятностного характера сборки ЭМ в ГАСК на основе моделей СМО [1], учетом ограничений на коэффициенты загрузки АТО, АТр. Допущения для моделей СМО: поступившая заявка не покидает систему и становится в очередь на обслуживание, замкнутая (число обслуживаемых приборов ограничено числом единиц АТО — m), многоканальная (число каналов n определяется числом единиц АТр), процесс подачи заявок на обслуживание АТО — марковский случайный с непрерывным временем (поток заявок от каждой группы АТО обладает свойствами отсутствия последействия [вероятность подачи заявки АТО на обслуживание в момент времени $t > t_0$ не зависит от того, как проходил процесс в ГАСК до времени t_0 и переход ГАСК из одного состояния в другое возможен в любой момент времени t], а также ординарностью; стационарность процесса подачи заявок обеспечивается непрерывностью работы АТО), потоки событий, переводящие ГАСК из одного состояния в другое — пуассоновские (интенсивность заявок на обслуживание АТО $\lambda = 1/T_ц$, где $T_ц$ — среднее время цикла сборки партии ЭМ или подготовки партии ЭК на соответствующем АТО). Потоки ординарны, постоянны (λ = const при равномерной интенсивности поступления заявок от одного АТО в рассматриваемом интервале времени), без последействия (в одно и то же время может быть подана и обработана одна заявка); интервал времени между двумя соседними событиями распределен по показательному закону. Эти положения применимы для суммарного потока заявок от всех групп АТО в ГАСК.

Далее рассчитывают показатель эффективности $P_{к2}$ для каждой структуры, происходит ранжирование структур по $P_{к2}$ и выбор оптимальной структуры ГАСК (метод оптимизации — полный перебор вариантов структур; учет ограничений), формирование на нее технологической документации (ТД).

Выходная информация последнего этапа — оптимальная структура ГАСК сборки ЭМ и ТД (маршрутная, операционные карты, блоки

управляющей информации для АТО с ЧПУ, таблица с расположением АТО на участке сборки).

Рассмотрим пример исследования (на моделях) структур ГАСК с помощью программного комплекса "Контур" для решения задач:

- определения параметров структур ГАСК;
- определения влияния на комплексный показатель эффективности $P_{к2}$ годовой программы выпуска ЭМ $N_{ЭМ}$; выбора оптимальной структуры ГАСК по показателю эффективности $P_{к2\ max}$;
- оценки эффективности вариантов структур ГАСК по сравнению с ручной сборкой ("Вручную") и сборкой в комплекте оборудования ("Комплект"), а также сборки ЭМ в трех типах комплексов ГАСК [структурах без оптимизации — КОП без опт., со структурной оптимизацией (концентрацией в операции разнотипных переходов) — КОП с опт., с комбинированной оптимизацией (параметрической и структурной) — КРП];
- определения влияния на эффективность ГАСК (на $P_{к2}$) параметрической оптимизации (оптимизации последовательности выполнения переходов), вида компоновки АТО и оптимизации транспортных операций;
- определения эффективности, полученной от проведения разных видов оптимизации (параметрической и структурной) в ГАСК в сравнении с вариантом КОП без опт., а также при сравнении структур между собой.

Объектами исследования были пять типов структур сборочных комплексов (три типа структур ГАСК, "Комплект", "Вручную") и восемнадцать вариантов компоновок АТО ГАСК.

Во всех структурах комплексов (ГАСК, "Комплект", "Вручную") применено серийно выпускаемое технологическое, транспортное и накопительное оборудование. В структурах ГАСК уровень его автоматизации — высокий (автоматическое, обслуживается промышленными роботами (ПР); имеет необходимые системы обеспечения: питатели ЭК, сборочные головки (СГ), накопители, устройства загрузки, фиксации плат; транспорт (самоходная тележка (СТ) и подвесной трансробот (ТПр)) с произвольным выбором адресата.

Типы структур ГАСК рассмотрены в порядке увеличения степени их совершенства: КОП без опт.; КОП с опт., КРП.

Цель исследований — оценка эффективности вариантов структур ГАСК по сравнению со сборкой "Вручную" и в "Комплекте"; определение выигрыша, полученного от применения ГАСК и сравнение структур между собой (рис. 3).

Установлено влияние годового объема выпуска $N_{ЭМ}$ на эффективность $P_{к2}$ (значение комплексного показателя эффективности структур ГАСК).

Сравнение сборки изделий в сборочных РК с использованием различных типов структур ГАСК (КОП без опт., КОП с опт. и КРП), а также "Комплект" и "Вручную" показало, что изделия ЭМ, собираемые в ГАСК и в "Комплекте", адаптированы к автоматизированной сборке, а для сборки "Вручную" — не адаптированы.

Учет варианта сборки "Вручную" позволил оценить влияние на эффективность ГАСК (на $P_{к2}$) проведения адаптации ЭМ (неадаптированные ЭМ собирают вручную).

Наибольшее значение $P_{к2}$ имеет структура ГАСК КРП. За ней следует структура КОП с опт., потом — КОП без опт. Например, для годовой программы $N_{ЭМ}$ = = 50 ЭМ/г. и номенклатуры N_A = 100 тип ЭМ/г. значения $P_{к2}$ следующие: 0,537; 0,294; и 0,290 (для сборки "Вручную" — 0,023; при сборке

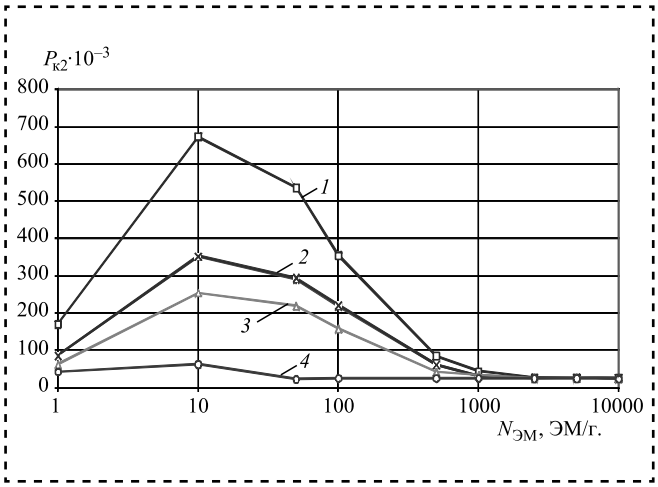


Рис. 3. Результаты исследования зависимости эффективности ($P_{к2}$) от типа структуры ГАСК при изменении программы выпуска ЭМ:
1 — КРП; *2* — КОП; *3* — "Комплект"; *4* — "Вручную"

в "Комплекте" — 0,218). Оценку эффективности структур ГАСК, "Комплект" и "Вручную" выполнили в сравнении со структурой ГАСК КРП.

Вариант "Комплект" имеет практически то же АТО, что и ГАСК КОП без опт., но в нем нет транспортно-накопительной системы, а число единиц АТО и обслуживающих рабочих увеличено (при программе выпуска с $N_{ЭМ} \geqslant 500$ ЭМ/г.). Это объясняется двухсменным режимом работы АТО в "Комплекте" (по сравнению с 2,5-сменным — в ГАСК); обслуживанием одним рабочим единицы АТО в "Комплекте" (против одного рабочего для четырех единиц оборудования — в ГАСК из-за более высокого уровня автоматизации, например, автоматизации загрузки и выгрузки плат). Это сказалось на соответствующих затратах. Постоянные затраты у варианта "Комплект" из-за увеличения количества АТО и производственной площади стали больше, чем у вариантов ГАСК. Переменные затраты превысили соответствующие затраты варианта ГАСК КОП без опт., но остались меньше затрат варианта КРП.

Постоянные транспортные затраты у "Комплекта" меньше аналогичных затрат в ГАСК, что объясняется применением более дешевого (неавтоматического) транспортного оборудования. Переменные транспортные затраты у "Комплекта" выше из-за увеличения времени на обслуживание заявок (возросло число обслуживаемых единиц АТО).

Производительность "Комплекта" при программе $N_{ЭМ} \approx 1...1000$ ЭМ/г. меньше, чем у ГАСК (даже для наиболее трудоемкой монтажной операции) из-за меньших значений коэффициентов загрузки, технологических потерь, готовности к работе ρ и годовом эффективном фонде времени, чем в ГАСК. При больших программах выпуска (начиная с $N_{ЭМ} \geqslant 1000$ ЭМ/г.) требуемое число единиц АТО в "Комплекте" на лимитирующей подготовительной операции значительно увеличилось (из-за этого годовая производительность у него немного больше, чем в ГАСК).

В целом эффективность (значение показателя $P_{к2}$) "Комплекта" в сравнении со всеми вариантами ГАСК меньше (особенно в диапазоне $10 \leqslant N_{ЭМ} \leqslant 1000$ ЭМ/г.).

Вариант "Вручную" проигрывает структурам ГАСК и "Комплекту" по всем основным показателям [количеству АТО и рабочих (их требуется значительно больше начиная с $N_{ЭМ} \geqslant 500$ ЭМ/г. из-за низкой производительности ручной сборки); переменным затратам (наибольшие во всем диапазоне программ выпуска ЭМ); постоянным затратам (превосходит таковые у структур ГАСК с $N_{ЭМ} \geqslant 500$ ЭМ/г. из-за увеличения количества монтажного АТО)]. Однако переменные транспортные затраты меньше у варианта "Вручную" (нет дорогостоящего транспортного оборудования). Время непрерывной работы у автоматизированных рабочих мест (АРМ) без подзагрузки значительно больше, чем у высоко производительного АТО. Интенсивность потока заявок в единицу времени значительно меньше от АРМ, что снижает штучно-калькуляционное время транспортных операций и, соответственно, переменные транспортные затраты. Постоянные транспортные затраты сравнимы с таковыми у "Комплекта" (используется одинаковое транспортное оборудование; превышение затрат уструктуры"Вручную"над"Комплектом",начиная с $N_{ЭМ} \geqslant 500$ ЭМ/г., обусловлено увеличением числа единиц транспортного оборудования — ручных тележек). Производительность у варианта "Вручную" значительно ниже, чем у "Комплекта" или структур ГАСК.

Переход от сборки ЭМ "Вручную" к сборке в ГАСК (КРП) значительно увеличивает $P_{к2}$ [например, для ЭМ состава: 20 интегральных микросхем в корпусе DIP $ИС_2$, 20 интегральных микросхем с планарными выводами $ИС_4$, 20 ЭРЭ и два ЭК неширокого применения (НШПр) с гарантией пайки выводов при годовой программе $N_{ЭМ} = 50$ ЭМ/г. и номенклатуре $N_A = 100$ типов ЭМ/г. Прирост $P_{к2}$ составил 95,67 %; средний прирост $P_{к2}$ при изменении $N_{ЭМ}$ в диапазоне 10...500 ЭМ/г. равен 87,1 %).

Переход от сборки ЭМ из "Комплекта" к сборке в ГАСК (КРП) также существенно увеличивает $P_{к2}$ (например, для ЭМ того же состава прирост $P_{к2}$ составил 59 %, а средний прирост $P_{к2}$ при изменении $N_{ЭМ}$ в диапазоне 10...500 ЭМ/г. равен 56,87 %). Это доказало преимущества сборки ЭМ многономенклатурного производства в ГАСК перед ручной сборкой и автоматизированной с автоматизацией отдельных операций.

Анализ результатов показал, что для одного и того же типа структуры ГАСК с увеличением номенклатуры N_A и $N_{ЭМ}$ значение $P_{к2}$ уменьшилось (например, с увеличением годовой программы $N_{ЭМ}$ в диапазоне 10...2 500 ЭМ/г. для структур типа КРП $P_{к2}$ уменьшился с 0,6734 до 0,0265). Это объясняется тем, что с увеличением годовой программы $N_{ЭМ}$ рост суммарных затрат (знаменатель $P_{к2}$) опережает рост производительности ГАСК (числитель $P_{к2}$). Аналогичная тенденция наблюдается и у других типов структур ГАСК.

Выводы

ПК "Контур" позволяет проектировать на моделях в автоматическом (пакетном) режиме (автоматизированные ТП, структуры ГАСК и их элементы) и в ручном режиме (режиме пользователя). С помощью ПК "Контур" при проектировании элементов структур ГАСК выполняют:

1) проектирование технологических переходов, операций сборки ЭМ из однотипных компонентов;

2) выбор/разработку специального технологического оснащения;

3) оценку характеристик технологических автоматов и выбор лучшего по комплексному показателю эффективности;

4) разработку ТП сборки ЭМ из однотипных и разнотипных компонентов и на их основе подструктур ГАСК;

5) проектирование компоновки оборудования;

6) разработку транспортных операций;

7) проектирование ТП сборки ЭМ из разнотипных компонентов и на их основе — структур ГАСК;

При разработке ГАСК выполняется параметрическая и структурная оптимизация, учитываются ограничения по затратам, точности и надежности, оптимизация запуска изделий в производство. При проектировании технологических переходов и операций осуществляются параметрическая (очередность монтажа) и структурная (интеграция компонентов на одном рабочем месте) оптимизация, выполняются ограничения по затратам, точности и надежности; при проектировании транспортных операций учитывается вероятностный характер сборки; обеспечивается требуемый (наибольший) уровень загрузки технологического оборудования.

Библиографический список

1. **Иванов Ю.В.** Автоматизация производства электронной аппаратуры. М.: Бином, 2015. 535 с.

2. **Иванов Ю.В.** Автоматизированное проектирование технологических процессов сборки ЭА в гибких автоматизированных комплексах: учеб. пособие. М.: МГТУ, 2004. 32 с.

3. **Иванов Ю.В.** Автоматизация проектирования оптимальных операций сборки электронных модулей на автоматах ГАСК: учеб. пособие. М.: МГТУ, 2004. 33 с.

4. **Иванов Ю.В., Лакота Н.А.** Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов: учеб. пособие. М.: Радио и связь, 1987. 464 с.

5. **Иванов Ю.В., Курносенко А.Е.** Специальное программное обеспечение автоматизированной разработки структур ГАСК многономенклатурного производства электронной аппаратуры: учеб. пособие. М.: МГТУ, 2002. 37 с.

6. **Иванов Ю.В., Курносенко А.Е.** Базы данных для САПР структур ГАСК сборки ЭМ первого уровня // Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006620158. 2006.

7. **Иванов Ю.В., Курносенко А.Е.** Модуль автоматизированной разработки расписания запуска ЭМ первого уровня в многономенклатурное производство // Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006611921. 2006.

8. **Иванов Ю.В., Курносенко А.Е.** САПР структур ГАСК сборки ЭМ первого уровня // Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006611922. 2006.

9. **Иванов Ю.В., Курносенко А.Е.** Модуль автоматизированной компоновки оборудования и проектирования транспортных операций // Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006611923. 2006.

10. **Иванов Ю.В., Курносенко А.Е.** Модуль определения оптимальной последовательности монтажа электронных компонентов на печатную плату и автоматизированной подготовки управляющих программ УТП для оборудования с ЧПУ // Свидетельство ФС интеллектуальной собственности. № 2006611924. 2006.

К сведению авторов журнала «Сборка в машиностроении, приборостроении»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию предоставляется статья в электронном виде – файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: sborka@mashin.ru

Требования к оформлению статьи

1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.

2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации http://teacode.com/online/udc/);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой (*) на первой странице.

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

5. После текста должен быть приведен список литературы, используемой при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускаются ссылки на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, .jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисуночную подпись. Подрисуночные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении ред. совета без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются

Плата за публикацию статей не взимается

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

ЭНЦИКЛОПЕДИЯ МАШИНОСТРОЕНИЕ

в 40 томах

Энциклопедия содержит в справочном виде основы теории, методы расчета, проектирования и конструирования машин, основные сведения о материалах и технологических процессах.

В ней обобщены передовой опыт и современное состояние научно-технического прогресса в различных отраслях промышленного комплекса с учетом сложившихся мировых тенденций.

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ МАШИНЫ, АГРЕГАТЫ И УСТАНОВКИ

ТОМ IV-20

Ю.С. Васильев, В.А. Умов, Ю.М. Исаев и др.;
под ред. **Ю.С. Васильева, Г.П. Поршнева.** — 2015. 584 с.
ISBN 978-5-94275-795-3. ISBN 5-217-01949-2

Цена 3000 р.

Дана характеристика использования гидроэнергетических ресурсов, применяемых типов и схем гидроэнергетических установок. Для лопастных гидравлических машин (турбин, насосов, насос-турбин, гидродинамических передач) и насосов трения (дисковых, вихревых и гидроструйных) рассмотрены основы теории и рабочего процесса, расчета и проектирования элементов проточной части, применяемые и перспективные конструкции машин и агрегатов, режимы работы, характеристики, нагрузки на элементы конструкции, вопросы управления и надежности работы. Изложены методы расчета и конструирования объемных гидромашин наиболее распространенных типов (главным образом, объемных гидравлических насосов), описание их конструкций, характеристик и особенностей эксплуатации.

Для инженеров-расчетчиков, конструкторов, научных сотрудников и эксплуатационного персонала, работающих в области гидромашиностроения, а также может быть полезна студентам, аспирантам и преподавателям высших технических учебных заведений.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru. Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 07.07.2016. Подписано в печать 18.08.2016. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.