ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ



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

Том 18

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочно-сварочные работы. Пайка

цемичев с.Ф., вашуков ю.А., наумов л.А., Рясный А.В. Совершенствование процесса изготовления неразъемных узлов из
разнородных материалов
Обеспечение качества. Испытания. Контроль
Ооеспечение качества. Испытания. Контроль
Можегова Ю.Н., Марихов И.Н. Точность автоматизированного
неразрушающего контроля пористости материалов
Трение и смазка в машинах и механизмах
Колесников В.И., Бардушкин В.В., Колесников И.В., Мясников Ф.В.,
Сычев А.П., Яковлев В.Б. Прогнозирование эксплуатационных упругих
свойств трибокомпозитов с микрокапсулами, заполненными жидкой
смазкой
Булгаревич С.Б., Бойко М.В. Активация и дезактивация трением физико-
кимических процессов в зоне фрикционного контакта
Емаев И.И., Криони Н.К., Нигматуллин Р.Г., Шустер Л.Ш. Влияние состояния модификатора на триботехнические характеристики пластичной
смазки в различных температурно-силовых условиях трения
Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Власов И.В. Формирование слоя переноса
при сухом трении сплава Al—Sn по стали
Эрлих Б.М. Перевод гармонических колебаний в состояние покоя 42
В помощь конструктору, технологу
Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Пронин А.И., Щелкунова М.Е.

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

Применение шаблонов вычислений при проектировании механизмов

Тел.: 8 (499) 269-54-98 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

В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

Редакционный совет MOCKBA

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

С.М. ЗАХАРОВ, д.т.н. И.Н. ЗИНИНА, к.т.н., доц.

Ю.Л. ИВАНОВ, д.т.н. А.В. ИГНАТОВ, к.т.н., доц. Ю.Г. КОЗЫРЕВ, к.т.н. А.И. КУМЕНКО, д.т.н., проф. И.А. ЛЮБИНИН, к.т.н. Е.А. МИКРИН, д.т.н., акад. РАН Б.В. ШАНДРОВ, к.т.н., проф. А.Г. ХОЛОДКОВА, к.т.н., проф.

Региональные редсоветы 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., прос 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.

KOBPOB

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.

OMCK В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

NPFN

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

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ, д.т.н., проф. В.В. НЕПОМИЛУЕВ, д.т.н., проф.

А.Н. СЕМЕНОВ, д.т.н., проф.

CAMAPA

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

СЕВАСТОПОЛЬ

Е.Л. ПЕРВУХИНА, д.т.н., проф. TOMCK

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

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

XAFAPORCK

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

MUHCK В.Л. БАСИНЮК, д.т.н.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф. **LUMEUP**

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

KUFR

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Попыша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

THE MONTHLY **JOURNAL FOR SCIENTISTS** AND MANUFACTURERS



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKI

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

CONTENTS

Assembly welding works. Soldering

Demichev S.F., Vashukov Yu.A., Naumov L.A., Riasny A.V. Perfection of

Quality assurance, Testing, Monitoring

Mozhegova Yu.N., Marikhov I.N. The accuracy of the automated non-destructive

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Kolesnikov V.I., Bardushkin V.V., Kolesnikov I.V., Mvasnikov F.V., Sychev A.P., Yakovlev V.B. Forecasting the operational elastic properties of Bulgarevich S.B., Boiko M.V. Friction activation and deactivation of physico-Emaev I.I., Krioni N.K., Nigmatullin R.G., Shuster L.Sh. Influence of a condition of the modifier on tribotechnical characteristics of plastic lubricant in various Rusin N.M., Skorentsev A.L., Vlasov I.V. Forming of transferred layer under Erlich B.M. Displacement of harmonic oscillations in a resting state 421

Industrial and design engineer's aid

Shchelkunov E.B., Vinogradov S.V., Pronin A.I., Shcelkunova M.E. The use of computing patterns in the design of mechanisms of parallel structure 427 Chair of Editorial Advisory Board — Member of Russian Academy of Science V.I. KOLESNIKOV

YILL IVANOV

A.V. IGNATOV Yu.G.KOZYREV

A.I. KUMENKO I.A. LUBININ

E.A. MIKRIN B.V. SHANDROV

PERM V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON

A.N. SEMENOV

Yu.A. VASHUKOV M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG

SEVASTOPOL

TOMSK

TULA

E.V. SHALOBAEV

E.L. PERVUKHINA

A.V. KOLUBAEV V.E. PANIN

A.A. MALIKOV V.V. PREYS

V.I. SCHPORT

KHABAROVSK

RYBINSK V.F. BEZIAZYCHNYI V.V. NEPOMILUEV

SAMARA

V.I. KOLESNIKOV A.A. RYZHKIN

A.G. KHOLODKOVA

Editors MOSCOW

A.S. VASIL'EV (Chief editor) V.V. BARDUSHKIN I.A. BUYANOVSKY M.V. VARTANOV A.A. GUSEV S.M. ZAKHAROV I.N. ZININA

Regional editors

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

IV ARRAMOV V.G. OSETROV B.A. YAKIMOVICH

KA7AN

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

MINSK V.L. BASINJUK M.L KHEIFETZ

GOMEL V.E. STARZHINSKI

KIEV A.S. ZENKIN V.A. MATVIENKO

DONETSK

A.N. MIKHAILOV

Poland

Belarus

Ukraine

P I FRKOVSKI E. LUNARSKII

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

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.

Executive editors of current issue:

E.M. NUZHDINA, I.M. GLIKMAN

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

СБОРОЧНО-СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ. ПАЙКА

УДК 621.791.18

С.Ф. Демичев, Ю.А. Вашуков, Л.А. Наумов, канд-ты техн. наук,

А.В. Рясный, канд. физ.-мат. наук

(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева) E-mail: demichev@mail.ru

Совершенствование процесса изготовления неразъемных узлов из разнородных материалов

Проведены теоретические и экспериментальные исследования процесса пластической деформации стыковых соединений из разнородных материалов в условиях локального индукционного нагрева при диффузионной сварке в вакууме (ДСВ). Установлено, что эффективность процесса механической активации таких соединений в значительной мере зависит от фактора формы деформируемого участка соединения, который определяется совокупностью конструктивно-технологических параметров данного процесса. Внедрение разработанных технологических рекомендаций по управлению фактором формы биметаллических соединений при ДСВ позволяет снизить тепловложения в них и за счет этого повысить их качество.

Are spent theoretical and experimental researches of process of plastic deformation of butt connections from diverse materials in the conditions of local induction heating at diffusive to welding in vacuum (DWV). It is established that efficiency of process of mechanical activation of such connections appreciably depends on size of the factor form of a deformable site of connection which is defined by set of is constructive-technological parameters of the given process. Introduction of the developed technological recommendations about management in size of the factor form of bimetallic connections at DWV allows to lower size heatinvestments in them and at the expense of it to raise (increasing) their quality.

Ключевые слова: разнородные материалы, стыковые соединения, диффузионная сварка в вакууме, исследования, пластическая деформация, фактор формы, снижение температурно-временных параметров.

Keywords: diverse materials, butt connections, diffusive welding in vacuum, researches, plastic deformation, form factor, decrease in temperature and time parameters.

Создание авиационно-космической и другой современной транспортной техники неразрывно связано с решением комплекса сложных задач — повышения долговечности, надежности и экономичности при одновременном снижении массогабаритных характеристик. Высокоэффективным решением этих задач в такой важной сфере производства, как соединение элементов составных узлов и конструкций, может быть замена механических способов крепления на сварку. Масштабное внедрение сборочно-сварочных процессов в производство сдерживается наличием ряда технических проблем. Необходимость снижения теплового воздействия на соединение при сварке возникает при соединении материалов, у которых структура и свойства ухудшаются под воздействием термического цикла сварки,

и особо остро — при соединении ряда востребованных в технике разнородных сочетаний материалов. Сварка под давлением открывает возможность сохранения исходных химического и фазового составов свариваемых материалов, позволяет получить благоприятную структуру соединения.

Уникальными возможностями в плане высокопрочного и надежного соединения широкого круга материалов, в том числе неметаллических, в различных комбинациях обладает метод диффузионной сварки в вакууме (ДСВ). Достоинства метода наиболее ярко проявляются при соединении разнородных и трудносвариваемых материалов. ДСВ успешно конкурирует с механическими способами соединения и относится к числу перспективных сварочных процессов [1, 2].



ДСВ — способ сварки термомеханического класса, вследствие чего снижение тепловложения в соединение требует соответствующего увеличения доли сообщаемой ему механической энергии, которая "поставляется" соединению в результате его пластической деформации.

Исследовали некоторые аспекты процесса пластической деформации разнородных материалов при ДСВ и ее влияния на прочность соединений. В качестве физического объекта изучения выбрано стыковое соединение деталей цилиндрической формы, выполненных из разнородных материалов с резко отличающимися свойствами, в условиях локального нагрева токами высокой частоты. Диффузионносварные соединения такого типа применяют в изделиях различного назначения [3].

Снижение температурно-временных параметров ДСВ, при условии получения равнопрочного соединения, приводит к необходимости увеличения сварочного давления [Казаков Н.Ф. Диффузионная сварка материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1981].

Диффузионная сварка, осуществляемая на таких режимах, по уровню сварочного давления, а также по такому технологическому признаку, как локальный характер нагрева соединения, близка подгруппе способов сварки давлением со среднеинтенсивным силовым воздействием — контактной стыковой, термокомпрессионной, трением и др. При определении сил деформирования таких соединений при сварке находят применение математические методы теории обработки металлов давлением.

Предложена схема деформации сварных соединений рассматриваемого типа. В соответствии с ней процесс деформирования соединения представляется как осадка нагретого участка "мягкой" детали (цилиндра высотой H_0) между жесткими элементами соединения: его более холодной частью и твердой деталью (рис. 1).

При решении задач теории обработки металлов давлением находит применение метод баланса работ, в основе которого лежит закон сохранения энергии [4]. При пластической деформации работа внешних сил $A_{\rm B}$ на соответствующих им перемещениях равна работе внутренних сил (работа пластической деформации) $A_{\rm h}$:

$$A_{\rm R} = A_{\rm II}. \tag{1}$$

Работа внешних сил включает и работу внешних сопротивлений $A_{\rm T}$ (сил контактного трения),

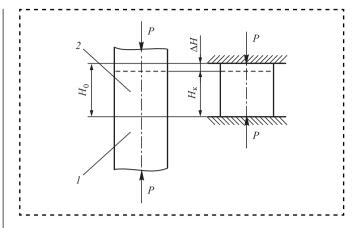


Рис. 1. Схема осадки стыковых соединений цилиндрической формы из разнородных материалов с резко различающимися механическими свойствами в условиях локального нагрева при ДСВ:

I — деталь из жаропрочного материала; 2 — деталь из менее прочного материала; H_0 , $H_{\rm K}$ — начальная и конечная высота деформируемого участка соединения

которая противоположна по знаку работе активных (деформирующих) сил A_n , тогда

$$A_p - A_{\rm T} = A_{\rm J}$$
 или $A_p = A_{\rm J} + A_{\rm T}$. (2)

Выражение (2) является уравнением баланса работ при пластической деформации.

В теории обработки металлов давлением работа деформирования при осадке цилиндрического тела вычисляется по формуле:

$$A_p = \sigma_s V \left[\ln \frac{h_0}{h} + \frac{1}{9} \left(\frac{d}{h} - \frac{d_0}{h_0} \right) \right], \tag{3}$$

где σ_s — напряжение текучести материала детали при температуре процесса осадки.

При выводе формулы (3) использованы следующие допущения:

- 1) площади поперечных сечений осаживаемого тела остаются постоянными по высоте, т.е. бочкообразность отсутствует;
- 2) на торцах цилиндра действуют максимальные касательные напряжения.

Первый член в квадратных скобках отображает работу деформации в случае осадки без трения, второй член — работу сил трения. При этом учитывается работа сил трения на обоих торцах детали.

При малых деформациях ($\leq 10\%$) истинная (или логарифмическая) степень деформации $\left(\ln\frac{h_0}{h}\right)$ приближенно равна степени деформации ϵ , т.е.



$$\ln \frac{h_0}{h} \approx \varepsilon;$$
(4)

$$\varepsilon = \frac{h - h_0}{h}. ag{5}$$

С учетом равенств (4) и (5), а также при условии постоянства объема деформируемого тела формулу (3) можно преобразовать к виду:

$$A_p = \sigma_s V \left\{ \varepsilon + \frac{1}{9} \frac{d_0}{h_0} \left[\frac{1}{\sqrt{(1-\varepsilon)^3}} - 1 \right] \right\}. \tag{6}$$

Первый член в фигурных скобках учитывает работу деформации в случае отсутствия трения на торцах осаживаемого цилиндра, второе слагаемое — работу сил трения.

Из формулы (6) следует, что при постоянных объеме деформируемого тела и напряжении текучести работа деформации $A_{\rm T}$ зависит только от степени деформации ε , а на работу сил трения $A_{\rm T}$, кроме того, оказывает влияние форма осаживаемого цилиндра — отношение его начальных размеров d_0/h_0 .

Графики зависимостей $A_{\rm II}=A_{\rm II}(\epsilon),\ A_{\rm T}=A_{\rm II}(\epsilon,\ d_0/h_0)$ представлены на рис. 2 (условно принято $\sigma_s,\ V,\ A_{\rm II}|_{\epsilon=10\,\%}=1$). В диапазоне изменения степени деформации ϵ осаживаемого цилиндра, характерном для диффузионных соединений (обычно не более 10 %), работа сил трения $A_{\rm T}$ почти линейно зависит от ϵ (при $d_0/h_0=$ const). С возрастанием значений фактора формы деформируемого цилиндра d_0/h_0 (при $\epsilon=$ const) работа сил трения $A_{\rm T}$ резко возрастает при неизменной работе деформации $A_{\rm II}$, что обуславливает увеличение ее доли в общей работе деформирования.

Графики на рис. 2 построены в предположении, что деформируемый объем V постоянен, т.е. они соответствуют случаю осадки цилиндров одинакового объема, но различной формы. Практический интерес представляет рассмотрение процесса осадки цилиндров одинакового диаметра, но различной высоты. В данном случае фактор формы осаживаемого цилиндра зависит от его высоты, при этом $V \neq \text{const.}$ Расчеты по формуле (6) показывают, что при осадке разновысоких цилиндров одинакового диаметра на одну и ту же величину Δh с уменьшением высоты осаживаемого цилиндра работа деформирования A_n и работа сил трения $A_{\scriptscriptstyle \rm T}$ увеличиваются, причем $A_{\scriptscriptstyle \rm T}$ растет значительно быстрее, чем A_p (рис. 3) (условно принято $A_p \Big|_{\stackrel{\Delta h}{\underline{\longrightarrow}} = 10\%} = 1$).

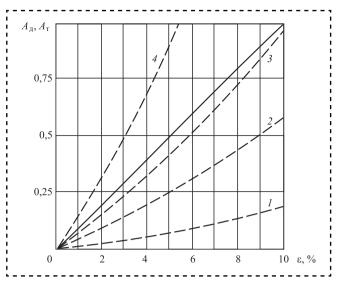


Рис. 2. Зависимости работы деформации $A_{\rm T}$ и работы силы трения $A_{\rm T}$ от параметров процесса осадки:

$$1 - d_0/h_0 = 1$$
; $2 - d_0/h_0 = 3$; $3 - d_0/h_0 = 5$; $4 - d_0/h_0 = 10$

Ввиду достаточной условности принятой схемы осадки рассматриваемых стыковых соединений и использования упрощающих допущений полученные расчетные зависимости можно рассматривать лишь как закономерности качественного порядка.

Проведенный анализ показал целесообразность поиска способов повышения величины фактора формы зоны деформации при сварке

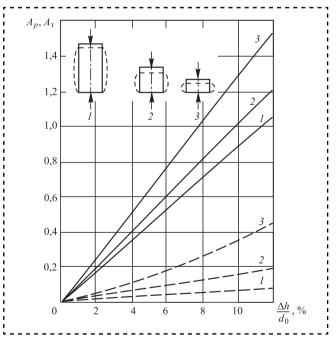


Рис. 3. Зависимости работы деформирования (— A_p) и работы сил трения (— $-A_{\rm T}$) при осадке цилиндра от его высоты и величины осадки:

$$1 - d_0/h_0 = 0.5$$
; $2 - d_0/h_0 = 1$; $3 - d_0/h_0 = 2$



соединений рассматриваемого типа. Эта задача сводится в соответствии с предложенной схемой (см. рис. 1) к изучению возможностей уменьшения высоты деформируемого участка детали из менее прочного материала, величина которого определяется положением его верхней границы. В ряде работ по сварке давлением с применением локального нагрева [Кочергин К.А. Л.: Машиностроение. 1987. 240 с.] границами зоны пластической деформации предлагается в первом приближении считать сечения, в которых величина напряжения сжатия равна сопротивлению пластической деформации материала деформируемой детали.

Сопротивление пластической деформации материала зависит от температуры, скорости и степени деформации: $\sigma = \sigma(T, \dot{\epsilon}, \epsilon)$. При диффузионной сварке, отличающейся большой продолжительностью и малой макропластической деформацией, скорости деформации невелики. В связи с этим упрочнением материала в очаге пластической деформации можно пренебречь и считать, что сопротивление пластической деформации зависит только от температуры. Следовательно, одним из главных факторов, определяющих высоту зоны деформации рассматриваемых стыковых соединений при локальном нагреве, является распределение температуры вдоль его оси; второй фактор, определяющий положение границы деформируемой зоны соединения, величина сварочного давления. Отсюда следует, что при постоянном сварочном давлении высота зоны деформации соединений рассматриваемого вида с увеличением градиента температур в продольном направлении должна уменьшаться.

Ширину зоны нагрева деталей можно регулировать путем применения индукторов различной конструкции, изменения частоты тока. Принципиально возможно сужение зоны нагрева соединения посредством устройства теплоотводов. Поскольку ширина зоны деформации зависит от градиента температур в продольном направлении "мягкой" детали (см. рис. 1), арсенал технологических способов управления шириной прогреваемой зоны соединения может быть дополнен таким приемом, как смещение индуктора относительно свариваемого стыка в сторону детали из более прочного материала.

Сформулированные выводы и рекомендации в целом подтверждаются результатами проведенных экспериментов. Опытные сварки выполняли на установке диффузионной сварки в вакууме типа A306.08 с рабочим объемом камеры 40 дм³; нагрев образцов и деталей проводили с помощью подключенного к ней высокочастотного генератора типа ЛЗ-67В (мощность 70 кВт, частота 67 кГц) с применением индукторов различной конструкции. В качестве модельного сочетания разнородных материалов с резко отличающимися свойствами выбраны сталь 30 и медь М1; диаметр опытных образцов составлял 20 мм, высота — 30 мм.

Сварку образцов осуществляли по способу принудительного деформирования (ССПД). Температура сварки в опытах составляла 1023 и 1123 К, время сварки — 10 мин, величина осадки соединений — 2 мм. Прочность соединений оценивали по результатам испытаний на срез с помощью спроектированного приспособления.

На рис. 4 приведены экспериментальные кривые распределения температур вдоль оси соеди-

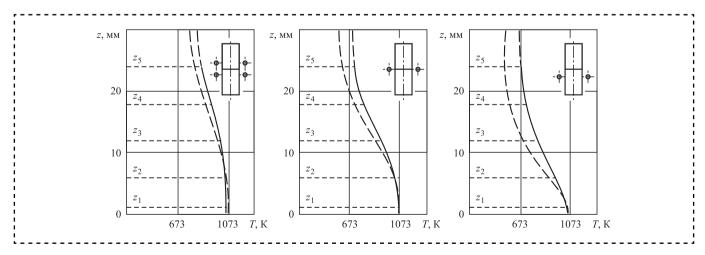


Рис. 4. Распределение температуры вдоль оси стыкового соединения меди М1 со сталью 30 в условиях индукционного нагрева:

a — двухвитковым индуктором; δ — одновитковым индуктором; ϵ — смещенным одновитковым индуктором; — — в начале изотермической выдержки; — — в конце изотермической выдержки



нения деталей из разнородных материалов при нагреве двух- и одновитковым индукторами, а также одновитковым индуктором в сочетании с таким упомянутым выше приемом, как смещение его в сторону детали из более жаропрочного материала ("дифференцированный нагрев"). Обмер сваренных образцов показал, что протяженность деформированных участков медных образцов находится в соответствии с реализованными параметрами нагрева соединений. Наиболее высокие значения фактора формы зоны деформации (d/h = 1,2...1,5) сварных соединений отмечены при дифференцированном нагреве (см. рис. 4, θ).

Заключение

Влияние фактора формы на формирование сварного соединения начинает проявляться при снижении температуры сварки. При одних и тех же температурно-временных параметрах режима сварки, определяющих уровень вводимой в свариваемый контакт тепловой энергии, прочность сварных соединений на срез, выполненных с помощью двухвиткового индуктора, ниже чем при нагреве соединений с помощью одновиткового индуктора: 100...115 МПа против 110...120 МПа. За счет рационального нагрева соединений прочность соединений удалось увеличить до 120...125 МПа.

Проведенные исследования показали, что при ДСВ разнородных материалов локализация макропластической деформации в области стыка приводит к увеличению контактной деформации. Возникающие при этом в стыке силы трения оказывают активирующее влияние на формирование сварного соединения. Рациональное

использование энергии, обусловленной контактным трением, позволяет существенно снизить уровень теплового воздействия на сварные соединения.

Полученные сведения указывают на необходимость учета при ДСВ разнородных материалов факторов условий их нагрева: конструкций индуктора и свариваемого узла, положения индуктора относительно сварного стыка, частоты тока и др. Изменение условий нагрева таких соединений при неизменном режиме сварки может привести к изменению их прочности. Этим, в частности, объясняется различие прочностных свойств соединений различного диаметра, полученных диффузионной сваркой при идентичных значениях параметров процесса, т.е. влияние так называемого масштабного фактора.

Библиографический список

- 1. **Барвинок В.А., Бордаков П.А., Усольцев А.Л.** Математическое моделирование диффузионных процессов при соединении титановых сплавов со сталями // Проблемы машиностроения. 2002. № 2. С. 56—60.
- 2. **Люшинский А.В.** Диффузионная сварка разнородных материалов. М.: Издательский центр "Академия", 2006. 208 с.
- 3. **Бордаков П.А., Демичев С.Ф., Миронов В.М., Купряхин Л.В.** Выносливость диффузионных соединений из разнородных материалов при знакопеременных нагрузках // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 2. С. 30—33.
- 4. **Вашуков Ю.А.** Исследование процесса постановки подкрепляющих элементов при образовании высокоресурсных соединений изделий из композиционных материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 6. С. 21—26.



ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА. ИСПЫТАНИЯ. КОНТРОЛЬ

УДК 681.2-52

Ю.Н. Можегова, канд. техн. наук, **И.Н. Марихов** (Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева) E-mail: kandy2701@mail.ru

Точность автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов

Теоретически обоснован способ автоматизированного определения пористости материалов. Разработано устройство контроля. Определена точность способа контроля пористости материалов.

Theoretically substantiated the method of automated determination of materials porosity. Have developed the monitoring device. Have been defined accuracy of the method of control the materials porosity.

Ключевые слова: автоматизированный неразрушающий контроль, пористость, газодинамический метод.

Keywords: computerized non-destructive testing, porosity, gas-dynamic method.

В настоящее время в машиностроении и приборостроении при изготовлении устройств контроля предъявляются высокие требования к точности и качеству производимых измерений. Широко используется неразрушающий автоматизированный контроль, позволяющий без разрушения изделий контролировать их физикомеханические свойства.

Пористость — основной параметр, характеризующий физико-механические свойства пористых материалов (металлокерамических, керамических и др.).

Поровую структуру материалов описывают:

- коэффициент газопроницаемости параметр, характеризующий свойство материала пропускать газ при наличии разницы давления газа с разных сторон изделия;
- коэффициент диффузии количественная характеристика скорости диффузии, равная количеству вещества, проходящего в единицу времени через участок единичной площади при градиенте концентрации, равном единице;
- коэффициент фильтрации параметр, характеризующий скорость фильтрации жидкости или газа через материал при градиенте напора, равном единице;
- коэффициент растворимости газа параметр, который показывает, какое количество

газа растворяется в единице объема материала при повышении давления на единицу;

— пористость — параметр, характеризующий отношение объема пор в теле к общему объему тела.

Пористость материалов подразделяют на открытую, под которой понимается объем пор, сообщающихся с поверхностью изделий, и закрытую. Сумма этих двух видов пористостей представляет собой общую пористость материала изделия.

При исследовании микроструктуры металлокерамических, керамических материалов в первую очередь обращают внимание на количество, размер и форму пор, так как иногда в металлокерамических и керамических изделиях наблюдаются раковины и макропоры, нарушающие однородность структуры и резко снижающие механические свойства изделий.

Физико-механические свойства металлокерамических и керамических материалов также зависят от характера пор. Например, для обеспечения хороших механических свойств требуется, чтобы поры были мелкие, замкнутые, округлой формы. Такие поры значительно меньше понижают прочность и вязкость изделий, чем сквозные, щелевидные поры, которые играют роль внутренних надрезов. Для самосмазывающихся пористых подшипников, наоборот, желательно иметь не замкнутые, а сообщающиеся между со-



бой поры. Для получения высоких магнитных свойств требуется, чтобы при определенной пористости материала количество пор было как можно меньше, следовательно, предпочтение отдается крупным, а не мелким порам.

Таким образом, автоматизированный контроль пористости материала изделий в процессе изготовления и эксплуатации имеет важное практическое значение.

Цель работы — разработка на основе теоретически обоснованного способа устройства неразрушающего контроля пористости материалов и обоснование его точности.

К неразрушающим методам контроля качества изделий относится газодинамический метод, основанный на исследовании процесса течения газа через контролируемый пористый материал, при котором определяются параметры пористости материалов. Параметры, характеризующие поровую структуру материалов на основе газодинамического метода [1]:

коэффициент растворимости:

$$K_{\Gamma} = \frac{2\mu V_{u} l t_{c}}{F^{2} v p_{a}^{2}} \frac{(p_{u} - p_{c})}{(t_{u} - t_{c})}; \tag{1}$$

коэффициент фильтрации:

$$K_{\Phi} = \frac{2\mu V_u l}{F \nu p_a^2} \frac{(p_u - p_c)}{(t_u - t_c)}; \tag{2}$$

открытая пористость:

$$\Pi = \frac{2V_u l t_c}{F^2 p_a} \frac{(p_u - p_c)}{(t_u - t_c)};$$
(3)

коэффициент газопроницаемости:

$$K_0 = \frac{2\mu V_u l}{F p_a^2} \frac{(p_u - p_c)}{(t_u - t_c)};$$
(4)

коэффициент диффузии:

$$D = \frac{V_u l (p_u - p_c)}{F p_c (t_u - t_c)},$$
 (5)

где µ — коэффициент динамической вязкости;

 $V_{\rm u}$ — объем; l — линейный размер в направлении филь-

 t_c — время, соответствующее переходу от кнудсеновского к ламинарному режиму течения газа;

$$t_c = \frac{db}{2D}$$
 или $t_c = \frac{4db\Pi\mu}{11K_0p_a}$,

 $p_{\scriptscriptstyle \rm M}$ — текущее давление газа;

 p_c — давление, соответствующее переходу от кнудсеновского к ламинарному режиму течения газа;

F — площадь материала;

v — коэффициент кинематической вязкости;

 p_a — атмосферное давление;

 t_u — текущее время, $t_u > t_c$; d — толщина изделия;

b — ширина изделия.

Для реализации способа разработано устройство неразрушающего контроля пористости материалов [2] (рисунок).

Устройство содержит измерительные камеры 1 и рабочую камеру 2, образующие с контролируемым изделием под усилием O герметичные полости 3, 4. Камеры соединены через систему трубопровода 5 с вакуумным насосом 6. Для исключения перетекания газа между полостями 3, 4 каждая из них имеет возможность отключения от общей магистрали посредством клапанов 7. Полость 4 рабочей камеры 2 соединена клапаном 8с атмосферой. Насос 6 отключается от магистрали клапаном 9. Полости 4 и 3 имеют выход на датчики давления газа 10, информация с которых автоматически через систему управления 11 передается на ЭВМ 12 со встроенным датчиком времени. Рабочая камера 1 снабжена датчиком температуры 13. который подключен к ЭВМ 12.

Путем последовательного смещения измерительных камер 1 по длине образца обеспечивается детальный контроль участков изделия на требуемое значение пористости, что позволяет выявить явный и скрытый брак. Вид и размеры измерительных 1 и рабочей 2 камер выбираются в зависимости от конфигурации детали или тех сечений, на которых необходимо определить параметры пористости.

Для более тщательного исследования структуры и свойств детали целесообразно устанавливать рабочую 2 и измерительные 1 камеры на все грани контролируемого изделия, что позволит проанализировать течение газа не только вдоль контролируемого материала, но и в боковые поры, и выявить более точную картину о параметрах пористости изделия и наличии возможных дефектов.

Результаты эксперимента по течению воздуха через изделие из сложной керамической системы с водоцементным отношением В/Ц = 0,6 и расходом цемента $\coprod = 450 \text{ кг на 1 м}^3$, изготовленное в формах 200×200 мм длиной 25 мм:

Длина изделия l, м 0,025 \pm 0,001 Давление, Па: с изделием F, м² 4,785·10⁻⁴ ± 4,679·10⁻⁷

Для обоснования точности способа найдем погрешность измерения открытой пористости материала от структуры материала, параметров



устройства и их точности при изготовлении, воспользовавшись выражением для определения погрешности косвенных измерений:

$$\delta\Pi = \sqrt{\left(\frac{\partial\Pi}{\partial V_u}\Delta V_u\right)^2 + \left(\frac{\partial\Pi}{\partial l}\Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial\Pi}{\partial p_u}\Delta p_u\right)^2 + \left(\frac{\partial\Pi}{\partial p_c}\Delta p_c\right)^2 + \left(\frac{\partial\Pi}{\partial F}\Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial\Pi}{\partial p_a}\Delta p_a\right)^2 + \left(\frac{\partial\Pi}{\partial t_u}\Delta t_u\right)^2 + \left(\frac{\partial\Pi}{\partial t_c}\Delta t_c\right)^2}.$$
 (6)

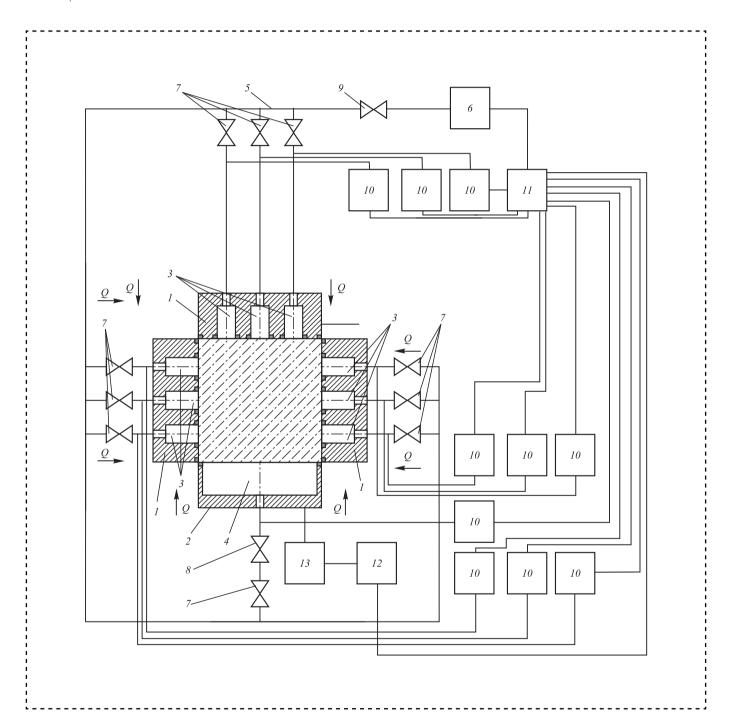


Схема устройства для определения параметров пористости:

1 — измерительная камера; 2 — рабочая камера; 3, 4 — герметичные полости; 5 — система трубопровода; 6 — вакуумный насос; 7, 8, 9 — клапаны; 10 — датчик давления газа; 11 — система управления; 12 — ЭВМ; 13 — датчик температуры



Коэффициенты влияния и погрешность измерения открытой пористости материала определены с применением MathCAD 15 (табл. 1).

Погрешность измерения открытой пористости материала

Таблица 1

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$\partial \Pi / \partial V_u$	9,442·10 ⁴	$\partial \Pi/\partial p_a$	$-4,459 \cdot 10^{-7}$
$\partial \Pi / \partial p_u$	$5,06 \cdot 10^{-4}$	$\partial \Pi / \partial F$	-188,842
$\partial \Pi / \partial p_c$	$-5,06 \cdot 10^{-4}$	$\partial \Pi/\partial l$	0,181
$\partial \Pi/\partial t_c$	$5,307\cdot10^{-4}$ $\partial\Pi/\partial t_u$ $-4,409\cdot10^{-4}$		$-4,409 \cdot 10^{-4}$
дП	$1,909 \cdot 10^{-3}$		

Открытая пористость равна:

$$\Pi \pm \Delta \Pi = 0.054 \pm 0.002.$$

Коэффициенты влияния в относительных единицах определим по формуле: $\frac{\partial \Pi}{\partial A} \Delta A \over \Delta \Pi$ (A — принимает значение исследуемого параметра) (табл. 2).

Влияние параметров на погрешность измерения открытой пористости материалов

Таблица 2

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Объем измерительной камеры V_u	0,0360	Давление газа p_u	0,7198
Давление газа p_c	0,6843	Время t_c	0,0028
Атмосферное давление p_a	ре давление p_a 0,0355		0,0463
Длина изделия <i>l</i>	0,0947	Время t_u	0,0023

Найдем погрешность измерения коэффициента газопроницаемости материала:

$$\delta K_{0} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{0}}{\partial V_{u}} \Delta V_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{0}}{\partial l} \Delta l\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{0}}{\partial p_{u}} \Delta p_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{0}}{\partial p_{c}} \Delta p_{c}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{0}}{\partial F} \Delta F\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{0}}{\partial p_{a}} \Delta p_{a}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{0}}{\partial t_{u}} \Delta t_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{0}}{\partial t_{c}} \Delta t_{c}\right)^{2}}.$$
(7)

С учетом коэффициента динамической $\mu = 0.182 \cdot 10^{-4} \, \Pi \text{a.c}$ и кинематической $\nu = 1.408 \cdot 10^{-5} \, \text{м}^2/\text{c}$ вязкости воздуха, с применением MathCAD 15 определена погрешность измерения коэффициента газопроницаемости материала (табл. 3).

Погрешность измерения коэффициента газопроницаемости материала

Таблица 3

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$\partial K_0/\partial V_u$	1,614 • 10 ⁻¹²	$\partial K_0/\partial p_a$	$-1,5241 \cdot 10^{-22}$
$\partial K_0/\partial p_u$	8,648 • 10 ⁻²⁰	$\partial K_0/\partial F$	$-1,614 \cdot 10^{-14}$
$\partial K_0/\partial p_c$	$-8,648 \cdot 10^{-20}$	$\partial K_0/\partial l$	$3,089 \cdot 10^{-17}$
$\partial K_0/\partial t_c$	7,535·10 ⁻²⁰ $\partial K_0/\partial t$ -7,535·10 ⁻		$-7,535 \cdot 10^{-20}$
∂K_0	$3,089 \cdot 10^{-19}$		

Таким образом, коэффициент газопроницаемости примет вид:

$$K_0 \pm \Delta K_0 = 7{,}722 \cdot 10^{-18} \pm 3{,}089 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2.$$

Коэффициенты влияния в относительных единицах определим по формуле $\frac{\frac{\partial K_0}{\partial A}\Delta A}{\Delta K_0}$ (табл. 4).



Таблица 4

Влияние параметров на погрешность измерения

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Объем измерительной камеры V_u	0,0360	Давление газа p_u	0,7190
Давление газа p_c	0,6835	Время t_c	0,0231
Атмосферное давление p_a	0,0709	Площадь материала F	0,0231
Длина изделия <i>l</i>	0,0946	Время t_u	0,0231

Найдем погрешность измерения коэффициента диффузии газа, используя выражение для определения погрешности косвенных измерений:

$$\delta D = \sqrt{\left(\frac{\partial D}{\partial V_u} \Delta V_u\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial l} \Delta l\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial p_u} \Delta p_u\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial p_c} \Delta p_c\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial F} \Delta F\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial p_a} \Delta p_a\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial t_u} \Delta t_u\right)^2 + \left(\frac{\partial D}{\partial t_c} \Delta t_c\right)^2}. \tag{8}$$

Результаты расчетов погрешности измерения коэффициента диффузии сведены в табл. 5.

Погрешность измерения коэффициента диффузии

Таблица 5

$ \frac{\partial D/\partial V_u}{\partial D/\partial p_u} \qquad \frac{4,492 \cdot 10^{-3}}{2,407 \cdot 10^{-10}} \qquad \frac{\partial D/\partial p_a}{\partial D/\partial F} \qquad \frac{-2,121 \cdot 10^{-13}}{-4,492 \cdot 10^{-5}} $
10
10
$\partial D/\partial p_c$
$\partial D/\partial t_c$ 2,098·10 ⁻¹⁰ $\partial D/\partial t_u$ -2,098·10 ⁻¹⁰
∂D 9,075 • 10 ⁻¹⁰

Таким образом, коэффициент диффузии примет вид:

$$D \pm \Delta D = 2.15 \cdot 10^{-8} \pm 9.075 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2/\text{c}.$$

Коэффициенты влияния в относительных единицах определим по формуле $\frac{\partial D}{\partial A} \Delta A$ (табл. 6).

Влияние параметров на погрешность измерения коэффициента диффузии

Таблица 6

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Объем измерительной камеры V_u 0,0360 Д		Давление газа p_u	0,7204
Давление газа p_c	0,6848	Время t_c	0,0231
Атмосферное давление p_a	0,0355	Площадь материала F	0,0232
Длина изделия <i>l</i>	0,0948	Время t_u	0,0231

Найдем погрешность измерений коэффициента фильтрации газа:

$$\delta K_{\Phi} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial V_{u}} \Delta V_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial l} \Delta l\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial p_{u}} \Delta p_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial p_{c}} \Delta p_{c}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial F} \Delta F\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial p_{a}} \Delta p_{a}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial t_{u}} \Delta t_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial t_{c}} \Delta t_{c}\right)^{2}}.$$
 (9)

Результаты расчетов погрешности измерения коэффициента фильтрации приведены в табл. 7. Таким образом, коэффициент фильтрации примет вид:

$$K_{\Phi} \pm \Delta K_{\Phi} = 5,484 \cdot 10^{-13} \pm 2,32 \cdot 10^{-14} \text{ c.}$$

Коэффициенты влияния в относительных единицах определим по формуле $\frac{\partial K_{\Phi}}{\partial A} \Delta A \over \Delta K_{\Phi}$ (табл. 8).



Таблица 7

Погрешность измерения коэффициента фильтрации

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$\partial K_{\Phi}/\partial V_u$	$1,146 \cdot 10^{-7}$	$\partial K_{\Phi}/\partial p_a$	$-1,082 \cdot 10^{-17}$
$\partial K_{\Phi}/\partial p_u$	$6,142 \cdot 10^{-15}$	$\partial K_{\Phi}/\partial F$	$-1,146 \cdot 10^{-9}$
$\partial K_{\Phi}/\partial p_c$	$-6,142 \cdot 10^{-15}$	$\partial K_{\Phi}/\partial l$	$2,194 \cdot 10^{-12}$
$\partial K_{\Phi}/\partial t_c$	5,351·10 ⁻¹⁵	$\partial K_{\Phi}/\partial t_u$	$-5,351 \cdot 10^{-15}$
∂K_{Φ}	$2,32 \cdot 10^{-14}$		

Таблица 8

Влияние параметров на погрешность измерения коэффициента фильтрации газа

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Объем измерительной камеры V_u	0,1788	Давление газа p_u	0,719
Давление газа p_c	0,6835	Время t_c	0,0231
Атмосферное давление p_a	0,0709	Площадь материала F	0,0231
Длина изделия <i>l</i>	0,0946	Время t_u	0,0231

Найдем погрешность измерения коэффициента растворимости газа:

$$\delta K_{\Gamma} = \sqrt{\left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial V_{u}} \Delta V_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial l} \Delta l\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial p_{u}} \Delta p_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial p_{c}} \Delta p_{c}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial F} \Delta F\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial p_{a}} \Delta p_{a}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial t_{u}} \Delta t_{u}\right)^{2} + \left(\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial t_{c}} \Delta t_{c}\right)^{2}}.$$
(10)

Результаты расчетов погрешности измерения коэффициента растворимости газа сведены в табл. 9.

Таблица 9

Погрешность измерения коэффициента растворимости газа

Параметр	Значение	Параметр	Значение
$\partial K_{\rm r}/\partial V_u$	0,12	$\partial K_{\rm r}/\partial p_a$	$-1,138 \cdot 10^{-11}$
$\partial K_{\rm r}/\partial p_u$	$6,455 \cdot 10^{-9}$	$\partial K_{\scriptscriptstyle \Gamma}/\partial F$	$-2,409 \cdot 10^{-3}$
$\partial K_{\rm r}/\partial p_c$	$-6,455 \cdot 10^{-9}$	$\partial K_{_{ m I}}/\partial l$	$2,305 \cdot 10^{-6}$
$\partial K_{\rm r}/\partial t_{\rm c}$	6,77·10 ⁻⁹ $\partial K_{\rm r}/\partial t$ -5,624·10 ⁻⁹		$-5,624 \cdot 10^{-9}$
∂K_{r}	$2,44 \cdot 10^{-8}$		

Таким образом, коэффициент растворимости примет вид:

$$K_{\rm r} \pm \Delta K_{\rm r} = 5.763 \cdot 10^{-7} \pm 2.44 \cdot 10^{-8} \,{\rm c}^2/{\rm M}^2.$$

Коэффициенты влияния в относительных единицах определим по формуле $\frac{\frac{\partial K_{\Gamma}}{\partial A}\Delta A}{\Delta K_{\Gamma}}$ (табл. 10).

Влияние параметров на погрешность измерения коэффициента растворимости газа

Параметр	Значение	Параметр	Значение
Объем измерительной камеры V_u	0,0359	Давление газа p_u	0,7184
Давление газа p_c	0,6830	Время t_c	0,0028
Атмосферное давление p_a	0,0709	Площадь материала F	0,0462
Длина изделия <i>l</i>	0,0945	Время t_u	0,0023

Наибольшее влияние на точность измерений оказывает точность измерения давления газа, определяемая точностью датчиков давления. При этом полученные результаты удовлетворяют требованиям производства.

Предлагаемое устройство рекомендуется к использованию на производстве при контроле пористости материала изделий, а также при проведении контроля свойств материалов конструкций в процессе их эксплуатации.

Библиографический список

- 1. **Способ** определения параметров пористости материалов: пат. 2235308 РФ, МПК⁸ G 01 N 15/08 / Житников Ю.З., Иванов А.Н., Матросова Ю.Н., Матросов А.Е., заявл. 13.04.2006, опубл. 10.09.2007.
- 2. **Устройство** измерения параметров пористости материалов: пат. 2560751 RU, МПК⁸ G 01 N 15/08 / Житников Ю.З., Можегова Ю.Н., заявл. 01.12.2015, опубл. 03.04.2017. Бюл. № 10.

ТРЕНИЕ И СМАЗКА В МАШИНАХ И МЕХАНИЗМАХ

УДК 539.3

- В.И. Колесников, академик РАН (Ростовский государственный университет путей сообщения),
- В.В. Бардушкин, д-р физ.-мат. наук (Национальный исследовательский университет "МИЭТ"),
- **И.В. Колесников**, канд. техн. наук, **Ф.В. Мясников**, **А.П. Сычев**, канд. физ.-мат. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения).
- В.Б. Яковлев, д-р физ.-мат. наук (Национальный исследовательский университет "МИЭТ")

Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов с микрокапсулами, заполненными жидкой смазкой*

Предложен метод прогнозирования эксплуатационных упругих свойств многокомпонентных матричных композитов с микрокапсулами, заполненными жидким веществом. Метод опирается на обобщенное сингулярное приближение теории случайных полей и позволяет учитывать геометрические размеры включений в оболочке. Проведено численное моделирование эффективных упругих характеристик (модуля Юнга и коэффициента Пуассона) композитов на основе фенилона с дисперсными включениями бесщелочного стекла и микрокапсулами, представляющими собой наполненные глицерином сферические оболочки каптона. Исследовано влияние на эксплуатационные упругие свойства трибокомпозитов геометрических размеров микрокапсул и объемного содержания компонентов.

A method of predicting the effective elastic properties of multicomponent matrix composites with microcapsules filled with a liquid substance is proposed. The method is based on the generalized singular approximation of random field's theory and allows considering the geometric dimensions of the inclusions in the shell. Numerical simulation of effective elastic characteristics (Young's modulus and Poisson's ratio) of composites based on phenylone with dispersed inclusions of E-glass and microcapsules, which are glycerin-filled spherical shells of a kapton, are carried out. The influence on the effective elastic properties of tribocomposites of the geometric dimensions of microcapsules and the volumetric concentration of components was investigated.

Ключевые слова: эффективные модули упругости, матричный композит, включение, микрокапсула, капсулирование, смазка, моделирование.

Keywords: effective elastic modules, matrix composite, inclusion, microcapsule, capsulation, lubricant, simulation.

Введение

Технологии капсулирования широко используют в таких отраслях промышленности, как производство минеральных удобрений и пищевых продуктов, фармацевтика и др. [1—3]. В последние годы все более широкое применение в триботехнике находят антифрикционные композитные покрытия, в состав которых входят наполненные смазочным материалом шарикоподобные капсулы, например, антифрикционные

лаки фирмы Bechem (Германия), изготовленные по передовой технологии микрокапсул, наполненных смазочным веществом и "утопленных" в поверхности лака. Микрокапсулы выделяют смазывающее вещество лишь при наличии нагрузок на поверхностях трения. При этом между поверхностями образуется высокоэффективная смазывающая пленка с длительным сроком эксплуатации.

Известно, что при механических нагрузках, значительно меньше разрушающих, композитные материалы с большой степенью точности ведут себя как гомогенные среды с эффективными упругими свойствами [4—8]. В техниче-

^{*} Грант Российского научного фонда (проект № 14-29-00116) в Ростовском государственном университете путей сообщения.



ских приложениях указанные свойства часто называют эксплуатационными. Они определяются тензором эффективных модулей упругости c^* , выражающим связь между полями напряжений $\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r}) \rangle$ и деформаций $\langle \epsilon_{kl}(\mathbf{r}) \rangle$, усредненными по представительному объему [4]:

$$\left\langle \sigma_{ij}(\mathbf{r})\right\rangle =c_{ijkl}^{*}\left\langle \varepsilon_{kl}(\mathbf{r})\right\rangle ,\ i,j,\,k,\,l=1,\,2,\,3,$$

где **r** — радиус-вектор случайной точки среды.

При вычислении эксплуатационных упругих характеристик неоднородных материалов с включениями, находящимися в жидкой или газообразной фазах, возникает серьезная проблема — либо только сдвиговый (жидкость), либо и сдвиговый и объемный (газ) модули упругости таких элементов неоднородности близки к нулю. А значит, модули податливости таких материалов стремятся к бесконечности [9, 10]. Любой подобный материал фактически не является односвязным (особенно это относится к пористым средам), а представляет собой однородную матрицу с развитыми внутренними границами. Модули упругости такого материала зависят от объемного содержания и геометрических характеристик замкнутых полостей, а именно от их формы, размеров и ориентации в пространстве. При рассмотрении данной задачи в более общей постановке можно считать, что жидкие (или газообразные) включения заключены в оболочку материала матрицы. Указанный подход дает возможность использовать понятие составного включения [11]. Подробный обзор исследований, посвященных прогнозированию эффективных упругих свойств неоднородных материалов с включениями, находящимися в жидкой или газообразной фазах, а также возникающих при этом проблемах моделирования и расчета, приведен в работе [12].

Разработка модели прогнозирования эффективных упругих свойств неоднородных сред с включениями, находящимися в жидкой или газообразной фазах, позволяющей осуществлять учет объемного содержания и геометрии включений, может быть проведена в рамках обобщенного сингулярного приближения теории случайных полей (ОСП) [4]. Так, например в работах [13, 14], ОСП использовали при расчетах эффективных свойств пористых и пористозаполненных (жидкостью) неоднородных сред. В настоящей работе с помощью ОСП в варианте метода самосогласования [4, 5] предложен подход, позволяющий совместить вычисление эф-

фективных характеристик матричных композитов с представлением о составном характере включений. Предлагаемый подход, в отличие от метода расчета, рассмотренного в работе [14], позволяет учитывать влияние материала и геометрических параметров оболочек микрокапсул, заполненных жидкостью, на эксплуатационные упругие свойства всего композита. Это может давать достоверную информацию о поведении антифрикционных композитных покрытий с жидкими смазочными включениями при механических нагрузках.

Описание метода прогнозирования

Для проведения корректного анализа эффективных упругих свойств композитов, позволяющего учитывать взаимодействие элементов неоднородности, состав, форму, ориентацию и концентрацию компонентов, необходимо решать уравнения равновесия упругой неоднородной среды. В общем случае получить соотношение для численных расчетов тензора эффективных модулей упругости c^* не удается. Поэтому для его вычисления используются различные приближения. Одним из таких приближений, является ОСП [4]. В его рамках используется только сингулярная составляющая тензора Грина уравнений равновесия, зависящая лишь от дельтафункции Дирака, а также вводится однородное тело сравнения, материальные константы которого входят в окончательное выражение для вычисления с*. Физический смысл ОСП заключается в предположении однородности полей напряжений и деформаций в пределах элемента неоднородности. В этом случае выражение для тензора c^* имеет следующий вид (индексы опущены) [4]:

$$c^* = \left\langle c(\mathbf{r})(I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle \left\langle (I - g(\mathbf{r})c''(\mathbf{r}))^{-1} \right\rangle^{-1}, (1)$$

где I — единичный тензор четвертого ранга;

 $c(\mathbf{r})$ — тензор модулей упругости; двумя штрихами обозначена разность между соответствующими параметрами неоднородной среды и однородного тела сравнения, характеристики которого обозначаются далее верхним индексом "c": $c''\mathbf{r}$) = $c(\mathbf{r})$ — c^{c} ;

 $g(\mathbf{r})$ — интеграл от сингулярной составляющей второй производной тензора Грина уравнений равновесия, являющийся тензором четвертого ранга.

Для вычисления компонент g_{ijkl} тензора $g(\mathbf{r})$ необходимо расчитать компоненты a_{ikli} тензора



четвертого ранга A, а затем в a_{iklj} по двум парам индексов $(i, j \ u \ k, \ l)$ провести операцию симметризации [4]. Компоненты a_{iklj} тензора A вычисляются по соотношению:

$$a_{iklj} = -\frac{1}{4\pi} \int n_k n_j t_{il}^{-1} d\Omega, \qquad (2)$$

где $d\Omega = \sin \theta d\theta d\phi$ — элемент телесного угла в сферической системе координат;

 t_{il}^{-1} — элементы матрицы, обратной матрице T с элементами $t_{il} = c_{ikli}^{\rm c} n_k n_i$;

 $n_k,\ n_j\ (k,\ j=1,\ 2,\ 3)$ — компоненты вектора внешней нормали к поверхности включения. Для эллипсоидальных включений с главными полуосями $l_1,\ l_2$ и l_3 компоненты вектора нормали определяются соотношениями

$$n_1 = \frac{1}{l_1}\sin\theta\cos\varphi$$
; $n_2 = \frac{1}{l_2}\sin\theta\sin\varphi$; $n_3 = \frac{1}{l_3}\cos\theta$.

Остановимся более подробно на процедуре усреднения. При выполнении условия эргодичности можно использовать усреднение по объему (для каждого компонента неоднородного материала) [4]. Тогда для случайной величины $a(\mathbf{r})$ операция усреднения по всему объему многокомпонентного композита сводится к суммированию средних значений по компонентам:

$$\langle a(\mathbf{r}) \rangle = \sum_{s} V_{s} \langle a_{s}(\mathbf{r}) \rangle,$$
 (3)

где V_s — объемное содержание компонента s-го типа;

 $a_s({\bf r})$ — соответствующая этому компоненту случайная величина, $\sum V_s = 1$ [4].

Рассмотрим метод прогнозирования эксплуатационных упругих свойств многокомпонентных матричных композитов со сферическими включениями в виде микрокапсул, заполненных жидкой смазкой. Метод основывается на ОСП и состоит из двух расчетных этапов. Первый этап служит для вычисления тензора эффективных модулей упругости двухкомпонентного композита, имитирующего сферические микрокапсулы, заполненные жидкой смазкой. Второй этап предназначен для проведения расчета эксплуатационных свойств многокомпонентного матричного композита, включениями которого служат сферические микрокапсулы с эффективными модулями упругости, вычисленными на первом этапе, а также функционализирующие добавки других материалов различной формы, ориентации в пространстве и концентрации.

Проводимые на этом первом вычисления эффективных модулей упругости включений, имитирующих микрокапсулы с жидкой смазкой, позволяют учитывать геометрические размеры включений в оболочке.

Рассмотрим двухкомпонентный матричный композит, материалом матрицы которого служит материал оболочек микрокапсул. В матрице случайным образом расположены включения жидкого смазывающего вещества, имеющие сферическую форму среднего радиуса *R*. Будем считать, что положение включений в объеме матрицы случайное, однако в целом материал является статистически однородным. Это приводит к наличию среднего расстояния между включениями, которое может быть связано с их объемной концентрацией.

Введем безразмерный структурный параметр h/R, с помощью которого возможен анализ геометрических размеров микрокапсул и их влияния на эксплуатационные упругие свойства многокомпонентных трибокомпозитов. Для этого выделим некоторый усредненный элементарный объем, в котором находятся три одинаковых включения (рис. 1). Пусть отдельное включение находится в центре сферы радиусом $R + h_1$, где величина h_1 такова, что все три сферы касаются друг друга. Тогда расстояние между центрами сфер равно $2(R + h_1)$. Поскольку в пространстве между касающимися друг друга сферами образуются пустоты, за характерную толщину h оболочек микрокапсул следует выбрать величину, несколько большую

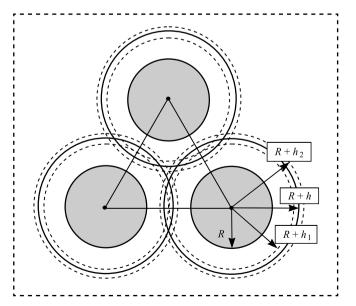


Рис. 1. Геометрическая модель первого этапа прогнозирования эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов



чем h_1 . В разрабатываемой модели предлагается выбрать:

$$h=\frac{h_1+h_2}{2},$$

где $h_2 = \frac{(2-\sqrt{3})R + 2h_1}{\sqrt{3}}$, а значение h_2 соответ-

ствует случаю, когда все три сферы радиусом $R+h_2$ проходят через центр равностороннего треугольника со стороной $2(R+h_1)$ (см. рис. 1).

Установим связь между объемной долей "внутреннего" жидкого тела $V_{\rm T}$ (или объемной долей оболочки $V_{\rm ob}$) и введенным структурным параметром h/R, что позволит вычислять эффективные модули упругости микрокапсул в зависимости от их геометрических размеров. Поскольку характерная толщина слоя оболочки равна h, а средний радиус "внутреннего" тела — R, то получим систему уравнений, связывающих объемные доли и геометрические размеры компонентов:

$$V_{\rm T} + V_{\rm O\bar{O}} = 1, \ \frac{V_{\rm O\bar{O}}}{V_{\rm T}} = \frac{\frac{4\pi(R+h)^3}{3} - \frac{4\pi R^3}{3}}{\frac{4\pi R^3}{3}} = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^3 - 1.$$

Отсюда объемные доли $V_{\rm T}$ и $V_{\rm of}$ выражаются через безразмерный параметр микроструктуры h/R с помощью формул:

$$V_{\rm T} = \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3}, \ V_{\rm of} = 1 - \left(1 + \frac{h}{R}\right)^{-3}.$$

Пример модельного расчета эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов. Рассмотрим трехкомпонентный композит, изотропной матрицей которого служит фенилон марки С2 (модуль Юнга E при сжатии 2822,4 МПа, предел текучести $\sigma_{\rm T}$ при сжатии 225,9 МПа) [15]. Коэффициент Пуассона ν для фенилона можно оценить с помощью следующего уравнения [16]:

$$\frac{1-2\nu}{6(1+\nu)} = \frac{\sigma_{\rm T}}{E},$$

из которого следует, что $v \approx 0.21$.

Пусть фенилоновый образец наполнен сферическими микрокапсулами, средний размер которых 120...250 мкм. Капсулируемое вещество — глицерин, объемный модуль которого равен 4,4 ГПа [17]. Оболочки капсул — изотропный ароматический полиимид каптон марки DuPont Kapton®HN (модуль Юнга 2,5 ГПа, коэффициент Пуассона 0,34) [18]. Средняя толщина оболочки 25...50 мкм. Для упрочнения композита

в фенилоновую матрицу вводятся также изотропные дисперсные включения бесщелочного стекла (БЩС) (модуль Юнга 76,2 ГПа, коэффициент Пуассона 0,22) [17, 19].

Учитывая геометрические размеры микрокапсул, возможные значения безразмерного параметра структуры h/R могут изменяться от 0,2 до 0,85.

Для проведения модельных расчетов при операциях над тензорами использовалась матричная форма записи [4]. При этом ненулевые элементы c_{ij} (i, j = 1,..., 6) симметрической матрицы тензора c модулей упругости для изотропного материала выражаются через модуль Юнга E и коэффициент Пуассона v следующим образом:

$$c_{11} = c_{22} = c_{33} = \frac{E(1 - v)}{(1 + v)(1 - 2v)};$$

$$c_{44} = c_{55} = c_{66} = \frac{E}{2(1 + v)};$$

$$c_{12} = c_{13} = c_{23} = \frac{Ev}{(1 + v)(1 - 2v)}.$$

эффективных Прогнозирование упругости микрокапсул (первый этап метода) осуществлялось с помощью ОСП [4]. Важнейшим моментом данного приближения является использование однородного тела сравнения, материальные константы которого входят в окончательное выражение (1) для вычисления эффективных упругих характеристик неоднородного материала. Одним из широко применяемых подходов для вычисления параметров тела сравнения служит метод самосогласования [4, 5]. Этот метод использовали на первом этапе прогнозирования при проведении расчетов эффективных упругих свойств микрокапсул (при каждом возможном значении параметра микроструктуры h/R). Для получения упругих характеристик тела сравнения (при каждом новом значении h/R) была организована итерационная процедура, в которой для его параметров брали значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве нулевого приближения для параметров тела сравнения выбирали характеристики, полученные в приближении Фойгта $c_{\text{Voight}} = V_{\text{T}} c_{\text{T}} + V_{\text{of}} c_{\text{of}}$ [4]. Такой подход позволил проводить вычисления, несмотря на то, что "внутреннее" тело микрокапсул является жидкостью, объемный модуль которого отличен от нуля, а модуль сдвига равен нулю. Во время проведения итерационной процедуры при каждом новом значении h/R



полагалось, что включения жидкого смазывающего вещества имеют средний радиус R=1. Кроме того, при вычислении по соотношению (2) компонент тензора $g(\mathbf{r})$ полагали, что $l_1=l_2=l_3=R=1$ (для глицерина) и $l_1=l_2=l_3=h/2$ (для каптона). Выход из итерационной процедуры при каждом h/R осуществляли, когда максимальная разница между эффективными модулями составляла менее 0,01.

На втором этапе метода по соотношению (1) проводили численное моделирование эксплуатационных упругих свойств трехкомпонентных трибокомпозитов на основе фенилоновой матрицы со сферическими микрокапсулами (эффективные модули упругости, которых были вычислены на первом этапе) и дисперсными включениями бесщелочного стекла (БЩС). Для вычисления параметров тела сравнения, как и на первом этапе, применялся метод самосогласования [4, 5]. Вначале фиксировали объемные содержания сфери-

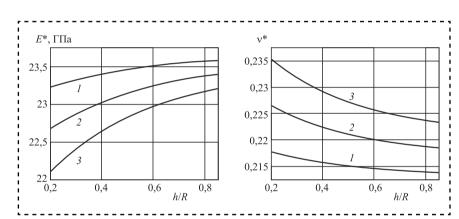


Рис. 2. Эксплуатационные упругие характеристики трибокомпозитов при фиксированной объемной доле дисперсных включений БЩС, равной 60 %, и изменении объемной доли микрокапсул:

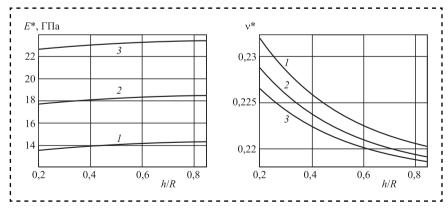


Рис. 3. Эксплуатационные упругие характеристики трибокомпозитов при фиксированной объемной доле микрокапсул, равной 10 %, и изменении объемной доли дисперсных включений БЩС:

$$1 - 50 \%$$
; $2 - 55 \%$; $3 - 60 \%$

ческих микрокапсул (при этом для каждого значения концентрации микрокапсул варьировались геометрические размеры "внутреннего" жидкого тела и оболочки с помощью изменения параметра h/R) и включений БЩС. Затем при этих объемных долях включений организовывали итерационную процедуру, в которой для параметров тела сравнения выбирали значения тензора модулей упругости (в матричной форме записи), полученные на предыдущем шаге итерации. В качестве начальных значений параметров тела сравнения брали упругие характеристики в приближении Хилла, т.е. среднего арифметического значений, полученных в приближениях

Ройсса
$$c_{\text{Reuss}} = \left[\sum_{s} V_s(c_s)^{-1}\right]^{-1}$$
 и Фойгта

 $c_{\text{Voight}} = \sum_{s} V_s c_s$ [4]. При вычислении по соотно-

шению (2) компонент тензора $g(\mathbf{r})$ полагали, что

 $l_1 = l_2 = l_3 = 1$ для всех элементов неоднородности модельных трибокомпозитов. Выход из итерационной процедуры осуществляли, когда максимальная разница между эффективными модулями составляла менее 0.01.

На рис. 2 и 3 приведены результаты численных расчетов значений эксплуатационных упругих характеристик — модуля Юнга E^* и коэффициента Пуассона v* модельных трехкомпонентных трибокомпозитов от изменения структурного параметра h/R при различных фиксированных процентных объемных содержаниях микрокапсул и дисперсных включений БЩС. При этом значения E^* и v^* вычисляли через элементы c_{ii}^* (i, j = 1, ..., 6) матрицы тензора c^* по следующим формулам [4]:

$$E^* = \frac{c_{44}^* \left(3c_{12}^* + 2c_{44}^*\right)}{c_{12}^* + c_{44}^*}, \ \ v^* = \frac{c_{12}^*}{2\left(c_{12}^* + c_{44}^*\right)}.$$

Проведенное численное моделирование показало, что при возрастании значений структурного параметра h/R, равносильному увеличению толщины h оболочки микрокапсул (при фиксированном значении R), приводит к увеличению значений модуля Юнга E^*



и к уменьшению значений коэффициента Пуассона v^* рассматриваемых трибокомпозитов. При этом увеличение объемного содержания дисперсных включений БЩС приводит к большей вариации значений E^* и v^* , чем изменение объемной доли микрокапсул. Характер зависимостей E^* и v^* при увеличении параметра h/R нелинейный.

Заключение

Предложен новый метод прогнозирования эксплуатационных упругих свойств много-компонентных матричных композитов со сферическими включениями в виде микрокапсул, заполненных жидким смазывающим веществом.

Метод позволяет учитывать как характерные относительные геометрические размеры микрокапсул (с помощью введения безразмерного параметра микроструктуры h/R), так и их концентрацию в многокомпонентном матричном композите.

Метод дает возможность оценить влияние концентрации, формы и ориентации в пространстве композита включений других материалов (функционализирующих добавок).

С помощью разработанного метода проведено численное моделирование эксплуатационных упругих характеристик трехкомпонентного трибокомпозита на основе фенилона со сферическими микрокапсулами (капсулируемое вещество — глицерин, оболочка — каптон) и армирующими дисперсными включениями БЩС.

Библиографический список

- 1. **Солодовник В.Д.** Микрокапсулирование. М.: Химия, 1980. 216 с.
- 2. Одинцов А.В. Капсулирование гранул минеральных удобрений в композиционные оболочки: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.08. Иваново, 2010. 130 с.
- 3. **Лопанов А.Н., Тихомирова К.В.** Физико-химические аспекты инженерии капсулирования. Белгород: Изд-во БГТУ, 2015. 294 с.
- 4. **Шермергор Т.Д.** Теория упругости микронеоднородных сред. М.: Наука, 1977. 399 с.
- 5. Паньков А.А. Методы самосогласования механики композитов. Пермь: Изд-во ПГТУ, 2008. 253 с.
- 6. **Микромеханика** поликристаллов и композитов (напряженно-деформированное состояние и разрушение) / В.И. Колесников и др. Ростов-на-Дону: Издво РГУПС, 2012. 288 с.

- 7. **Сычев А.П., Бардушкин В.В.** Микромеханика трибокомпозитов (напряженно-деформированное состояние, износ и разрушение). Саарбрюккен: Lambert Academic Publishing, 2013. 180 с.
- 8. Эффективные упругие характеристики антифрикционных композитов на эпоксидной основе / В.И. Колесников и др. // Наука Юга России. 2010. Т. 6. № 1. С. 5—10.
- 9. **Вавакин А.С., Салганик Р.Л.** Эффективные упругие характеристики тел с изолированными трещинами, полостями и жесткими неоднородностями // Известия АН СССР. Механика твердого тела. 1978. № 2. С. 95—107.
- 10. Левин В.А., Лохин В.В., Зингерман К.М. О построении эффективных определяющих соотношений для пористых материалов со случайно распределенными порами при конечных деформациях и их наложении // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2000. Спецвыпуск. С. 107—115.
- 11. **Christensen R.M.** A critical evaluation of a class of micro-mechanics models // J. Mech. Phys. Solids. 1990. Vol. 38. P. 379—404.
- 12. **Устинов К.Б.** Об определении эффективных упругих характеристик двухфазных сред. Случай изолированных неоднородностей в форме эллипсоидов вращения // Успехи механики. 2003. № 2. С. 126—168.
- 13. **Баюк И.О.** Теоретические основы определения эффективных физических свойств коллекторов углеводородов // Ежегодник РАО. 2011. Вып. 12. С. 107—120.
- 14. **Бардушкин В.В., Сорокин А.И., Сычев А.П.** Моделирование эксплуатационных упругих свойств полимерных композитов с наполненными смазкой сферическими микрокапсулами и дисперсными включениями бесщелочного стекла // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 10. С. 43—47.
- 15. **Буря А.И., Шерстюк А.И., Иващенко В.Н.** Влияние содержания ультрадисперсных алмазов на свойства композитов на основе ароматического полиамида // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент техника и технология его изготовления и применения: сб. науч. тр. / Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины. Киев, 2009. Вып. 12. С. 336—341.
- 16. **Козлов Г.В., Сандитов Д.С.** Ангармонические эффекты и физико-механические свойства полимеров. Новосибирск: Наука, 1994. 261 с.
- 17. **Физические** величины: справочник / под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
- 18. **Интернет-ресурс.** Режим доступа: http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/membranes-and-films/polyimde-films/documents/DEC-Kapton-summary-of-properties.pdf
- 19. **Гутников С.И., Лазоряк Б.И., Селезнев А.Н.** Стеклянные волокна. М.: Изд-во МГУ, 2010. 53 с.



УДК:621.891:541

С.Б. Булгаревич, д-р хим. наук, **М.В. Бойко**, канд. техн. наук (Ростовский государственный университет путей сообщения) E-mail: bulgarevich@rambler.ru

Активация и дезактивация трением физико-химических процессов в зоне фрикционного контакта*

Построена общая энергетическая схема активации и дезактивации физико-химических процессов в области фрикционного контакта трущихся тел при сухом и граничном трении скольжения и качения.

Энергетическая схема активации и дезактивации молекул при фотохимических процессах применена к механоактивации и дезактивации при трении. Фотохимические и механоактивированные процессы — высоко-энергетичны. Процессы, активированные указанными способами, весьма многообразны, могут протекать последовательно и параллельно и сопровождаться излучениями в широких энергетических диапазонах.

The overall energy diagram of activation and deactivation of physical and chemical processes in the area of frictional contact of the rubbing bodies in dry and boundary sliding and rolling friction was been developed.

Energy diagram of the activation and deactivation of molecules in the photochemical processes was been applied to mechanical activation and deactivation of the friction. The total for the photochemical and mechanically activated processes — are both high-energy. The processes activated by the above methods can be very diverse, taking place in parallel and in series and was been accompanied by radiation in a wide energy range.

Ключевые слова: физико-химические процессы, активация, дезактивация, механоактивация, излучательные переходы, безызлучательные переходы.

Keywords: physical and chemical processes, activation, deactivation, mechanically activation, radiative transitions, nonradiative transitions.

Кинетика процессов механоактивации при трении скольжения и качения по существу не отличается [1]. Общая энергетическая схема активации и дезактивации молекул имеется лишь фотохимических процессов (диаграмма Яблонского) [2, 3]. Фотоактивация и дезактивация различных фотохимических процессов существенно отличаются от механоактивации и дезактивации при трении своей исключительной селективностью. Тем не менее общий подход к обсуждению энергетики, развитый в фотохимии, полезен и для трибологии. Общность фотохимических и механоактивированных процессов заключается в том, что оба процесса высокоэнергетичны и в большинстве случаев не могут быть инициированы исключительно термически. Для термической активации подобных процессов нужны слишком высокие температуры, которые приводят к разрушению объектов исследований,

и в обычных условиях подобная термоактивация просто невозможна. В то же время, как фотохимическая, так и механоактивация в состоянии запустить такие процессы, которые термически для обычных условий просто не достижимы.

Процессы, активированные указанными способами, весьма многообразны, протекают последовательно и параллельно и сопровождаются излучениями в широких энергетических диапазонах. Энергетика механоактивации может быть весьма велика и в состоянии инициировать несамопроизвольные процессы со стандартным изобарным потенциалом $\Delta G^0 \approx$ ≈ 100...1000 кДж/моль, что достаточно не только для того, чтобы запустить реакции с различными органическими соединениями, входящими в состав смазочных композиций, но и вызвать разложение оксидных слоев на поверхностях трущихся тел, оплавление металлических поверхностей в зоне непосредственного фрикционного контакта, испарение металла и даже его ионизацию [4].

^{*} Исследование выполнено при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 14-29-00116).



Построение общей энергетической схемы возбуждения и дезактивации физико-химических процессов в области фрикционного контакта трущихся тел, как при сухом, так и при граничном трении, в том числе и при трении качения позволит лучше ориентироваться в энергетике процессов, затрагивающих конденсированные компоненты смазочной среды в зоне непосредственного фрикционного контакта трушихся тел.

Процессы активации и дезактивации соединений при фотовозбуждении, протекающие при поглощении и испускании молекулами соединений квантов света, приведены на рис. 1 [2, 3].

На диаграмме Яблонского для простоты предполагается, что основное состояние S_0 невозбужденной молекулы обладает суммарным нулевым электронным спином. Когда полный электронный спин системы равен S, мультиплетность состояния равна 2S + 1. При наличии в молекуле только спаренных электронов S = 0, откуда следует, что мультиплетность системы будет равна единице. Поэтому состояния с нулевым спином называют синглетными. Переходы $S_0 \to S_1, \ S_0 \to S_2, \ S_0 \to S_3, \$ обозначенные сплошными стрелками вверх, соответствуют поглощениям квантов излучения и образованиям возбужденных синглетных состояний, у которых спиновая мультиплетность не меняется (суммарный электронный спин равен нулю). Жирными горизонтальными линиями на диаграмме обозначены основной и возбужденный электронные уровни без учета вращательных и колебательных состояний молекул. Колебательные и вращательные уровни энергии электронных состояний молекулы условно обозначены

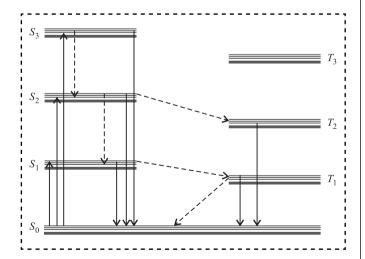


Рис. 1. Диаграмма Яблонского: S_0 , S_1 , S_2 и S_3 — основное и возбужденные синглетные состояния молекулы; T_1 , T_2 и T_3 — возбужденные триплетные состояния молекулы

тонкими горизонтальными линиями, они расположены очень близко друг к другу, их число исключительно велико, что невозможно отобразить на диаграмме. Указанные переходы происходят от вращательных и колебательных уровней основного состояния к таковым возбужденного состояний. Сплошными стрелками вниз обозначены излучательные переходы из возбужденных состояний в основное. В случае переходов $S_1 \rightarrow S_0$, $S_2 \rightarrow S_0$, $S_3 \rightarrow S_0$ происходит флюоресценция или синглет-синглетное испускание света. Время жизни первого возбужденного синглетного состояния составляет примерно $10^{-6}-10^{-9}$ с.

Наряду с излучательными переходами из возбужденных состояний более высокой энергии на возбужденные состояния меньшей энергии, а также в основное состояние S_0 возможны безызлучательные (тепловые) переходы, которые называют конверсионными. Эти переходы на диаграмме обозначены штриховыми стрелками. Если безызлучательный переход происходит без изменения спиновой мультиплетности, он называется внутренней конверсией или тепловой релаксацией возбужденной молекулы. В ряде случаев возможен безызлучательный переход в возбужденные состояния, обладающие другой спиновой мультиплетностью, в триплетные состояния ($S_2 \to T_2, S_1 \to T_1$). Суммарный электронный спин таких состояний равен единице в силу того, что в возбужденном состоянии на электронном уровне молекулы находится два электрона с параллельными спинами (1/2 + 1/2 = 1). Отсюда спиновая мультиплетность S = 2 + 1 = 3. В магнитном поле молекула с суммарным электронным спином, равным единице, может иметь три проекции собственного электронного момента на направление поля, спиновые составляющие которых равны -1, 0, +1 соответственно, и это разные состояния.

Возбужденные триплетные состояния T_1 , T_2 и T_3 находятся по величине их энергии несколько ниже, чем возбужденные синглетные состояния S_1 , S_2 и S_3 . Это связано с тем, что волновая функция любого электронного состояния должна быть антисимметричной. Так как спиновое состояние триплета симметрично, то координатная волновая функция этого состояния антисимметрична. Это приводит к тому, что электроны с параллельными спинами на верхнем электронном уровне в триплетном состоянии в среднем более удалены друг от друга, чем в соответствующем синглетном состоянии, что и дает выигрыш энергии в возбужденном триплете по сравнению с синглетом за счет понижения



электрон-электронного отталкивания в триплетном состоянии. Безызлучательный переход между состояниями с различными спинами называют интеркомбинационной конверсией.

В спектроскопии синглет-триплетный безызлучательный переход называют "запрещенным". На практике это означает, что вероятность такого перехода значительно меньше, чем вероятность внутренней конверсии. Триплетные возбужденные состояния существуют значительно дольше, чем возбужденные синглетные. Время жизни состояния T_1 может составлять от 10^{-2} до 10^{-3} с, а иногда и секунды. Излучательные переходы из состояний T_1 , T_2 и т.д. в состояние S_0 называют фосфоресценцией или триплет-синглетное испускание света.

Диаграмма Яблонского качественно отображает многообразие процессов поглощения света, а также безызлучательных и излучательных переходов, следующих за таким поглощением в молекулярных системах. Фотохимические превращения, инициируемые поглощением световых квантов, могут осуществляться за счет возбужденных как синглетных, так и триплетных состояний, а утрата фотовозбуждения молекул может происходить всеми обозначенными на диаграмме способами.

Предположим, что диаграмма трибовозбуждения в простейшем случае, когда затрагивается только адсорбционный слой на поверхностях трущихся тел, будет похожа на диаграмму Яблонского. Рассмотрим случай, когда осуществляется возбуждение только конденсированной адсорбционной среды на поверхности трущихся тел, а сам материал твердых тел при этом не затрагивается. При этом возбуждение осуществляется не за счет поглощения квантов света, а путем поглощения механической энергии движения одного тела по поверхности другого в зоне непосредственного трибоконтакта. Вместо отдельных электронных уровней фотовозбуждаемых молекул имеются электронные зоны уровней энергии вместе с колебательными состояниями в этих зонах. Для простоты полагаем, что рассматриваемый адсорбционный слой — диамагнетик. Рисунок 2, отображающий возбуждение и дезактивацию в адсорбционном слое, принципиально не отличается от рис. 1. На нем обозначено больше уровней основного и возбужденного состояний в соответствующих энергетических зонах, в том числе колебательных и переходных состояний, которые не являются молекулярными структурами и поэтому должны жить меньше молекулярных. Жирными линиями

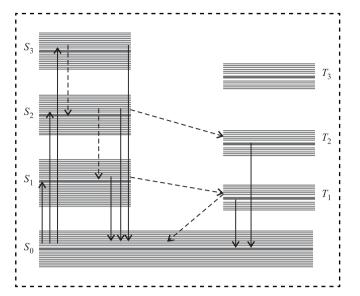


Рис. 2. Схема расположения уровней энергетических зон в возбужденных состояниях: S_0 , S_1 , S_2 и S_3 — уровни, обозначающие средние значения энергий основного и возбужденных синглетных состояний молекул адсорбционного слоя; T_1 , T_2 и T_3 — возбужденные триплетные состояния этих молекул

внутри линий энергетических зон обозначены некоторые средние значения энергий этих зон. Схема дезактивации возбужденных состояний прежняя.

На диаграмме уровень S_1 и другие соответствующие ему уровни энергетических зон и выше приведенные аналогичные уровни возбужденных состояний часто относятся к переходным возбужденным состояниям, которые не являются молекулярными структурами, поскольку в переходном состоянии вдоль координаты реакции возникает разрыв/образование химических связей. Остальные смещения ядер возбужденной молекулы происходят так же как и в молекулярной структуре.

Если рассматривать только возбуждение адсорбционного слоя, то, скорее всего, имеет место разрыв адсорбционной связи молекулы адсорбата с ее подложкой, которая представляет собой твердые компоненты трущихся тел. Более высокие возбужденные состояния S_2 , S_3 и т.д. вполне могут быть и полными молекулярными структурами, в которые из переходного состояния трибовозбуждения переходят в десорбированные молекулы из адсорбционного слоя при достаточном количестве подводимой механической энергии. Уровень S_1 и его колебательные составляющие, видимо, находятся выше уровня S_1 для обычной молекулярной структуры, например, в растворе. Этот уровень существенно инверсно заселен [5].



Упрощенные рассмотрения позволяют построить общую диаграмму возбуждения и дезактивации возбужденных состояний для системы металлических трущихся тел с адсорбированными на их поверхностях молекулами органических соединений, например смазочной основы или ее присадок (рис. 3). Диаграмма соответствует самой распространенной ситуации, при которой работа выхода электрона из металла меньше, чем работа выхода электрона из диэлектрика [6]: $\chi_{\rm д} > \chi_{\rm m}$, где $\chi_{\rm m}$, $\chi_{\rm m}$ — работы выхода электрона из диэлектрика и металла соответственно. При этом поверхность диэлектрика заряжается отрицательно, а металла — положительно.

Потенциал ионизации углеводородов составляет для алканов 10...13, алкенов 9...10, алкилбензольных углеводородов 8,5...9,5, полициклических

аренов — менее 8 эВ (800...1300 кДж/моль) [7]. В то же время потенциал ионизации большинства металлов (работа выхода электрона) не превышает 5 эВ (482,5 кДж/моль) [8].

Средняя величина самых нижних уровней энергетической зоны (жирная черта) на диаграмме соответствует металлическим поверхностям трущихся тел (они для простоты считаются по природе одинаковыми) и отвечает энергетическим уровням металлических поверхностей с адсорбированными на них молекулами. На диаграмме линиями отображены энергетические уровни молекулярных (атомных) состояний, а не энергии отдельных электронных состояний, которые может занимать только один электрон в соответствии со статистикой Ферми—Дирака [9]. Уровни S_0 отвечают энергиям десорбированных органических молекул на металлических поверхностях. Уровни

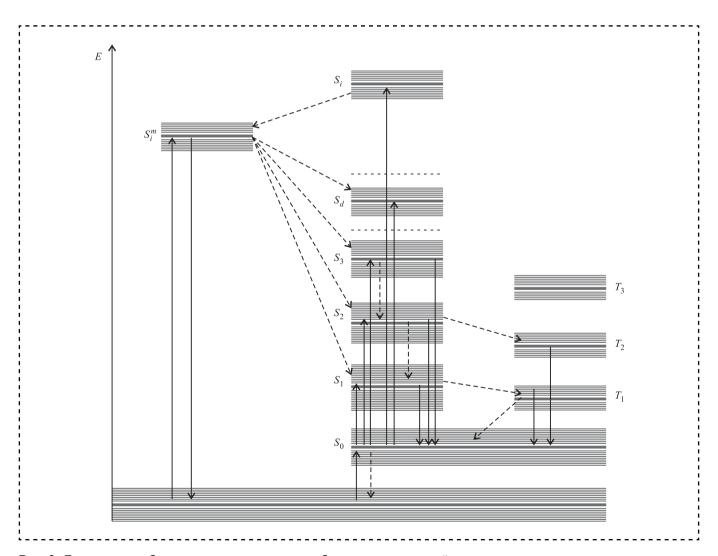


Рис. 3. Диаграмма возбуждения и дезактивации возбужденных состояний для системы металлических трущихся тел с адсорбированными на их поверхностях органическими соединениями



Таблица 1 Прочность связи некоторых органических соединений

Разрываемая связь	ΔH , ккал/моль (кДж/моль)
H-CH ₃	104 (435,4)
H-CH ₂ CH ₃	98 (410,3)
$H-C_6H_5$	103 (431,2)
CH ₃ —CH ₃	88 (368,4)
CH ₃ —CHCH ₂	92 (385,2)
Н—ОН	119 (498,2)
O=O	119 (498,2)
O=CO	128 (535,9)
CH ₂ =CH ₂	163 (682,4)
CF ₂ =CF ₂	76,3 (318,2)

зон S_1 , S_2 , S_3 и т.д. отвечают возбужденным состояниям десорбированных молекул в смазочной среде. Уровни S_d соответствуют энергиям диссоциации органических молекул, а уровни S_i — энергиям ионизации органических молекул. Уровни S_i — синглетные, а T_i — триплетные, на которые молекулы органических соединений могут перейти безызлучательно при дезактивации возбуждения. Уровень энергии S_i^m соответствует ионизации металлических поверхностей при наличии адсорбированных на них органических молекул (этот уровень примерно соответствует работе выхода электрона с поверхности тела или контртела). На диаграмме сплошные стрелки вверх соответствуют трибоактивации, вниз — дезактивации возбужденных состояний излучательно. Штриховые стрелки отвечают безызлучательным переходам между различными возбужденными уровнями.

Данные о прочности связи органических соединений соответствуют затрате энергии гомо-

литического разрыва одного моля связи (изменение энтальпии) в стандартных условиях у соединений в газообразном состоянии [10] (табл. 1).

Энергии ионизации металлических тел в большинстве случаев вполне может хватить на разрыв химических связей органических соединений, которые могут присутствовать в смазочном материале (см. табл. 1, рис. 3).

На схеме возбуждения дезактивации трущихся металлических тел при наличии смазочного материала не обозначены уровни энергии, соответствующие разрушению металла. В табл. 2 приведены энтальпии образования ряда металлов из их паров в стандартных условиях, а также энтальпии плавления и испарения.

Энтальпии механического разрушения металлических тел будут не меньше взятых с обратным знаком энтальпий образования этих тел из металлических газов. Процесс разрушения, происходящий при износе за счет трения, должен идти через стадии образования линейных дислокаций. Энергия образования линейной дислокации в металле в пересчете на один параметр кристаллической ячейки составляет не менее 3 эВ (300 кДж/моль) [11]. Одной такой величиной не обойтись, так как необходимо большое число таких мольных дислокаций. Энергетический уровень разрушения металлических тел расположится не ниже S_i . Очевидно также, что обратимой деградации уровня возбуждения, соответствующего разрушению металла, не существует. Поэтому эти уровни не нанесены на диаграмму.

Возможна и другая ситуация, при которой работа выхода электрона из металла больше, чем работа выхода электрона из диэлектрика [6]: $\chi_{\rm L} < \chi_{\rm M}$. При этих условиях в месте контакта с металлом образуется слой, обедненный основными носителями заряда (электронами). Энергетическая схема такого контакта будет

Энтальпии образования ряда металлов из их паров в стандартных условиях

 $-\Delta H_{298}^{\,0}$, кДж/моль Элемент $T_{\Pi\Pi}$, K $\Delta H_{\rm пл}$, кДж/моль $\Delta H_{\rm исп}$, кДж/моль, при $T_{\rm кип}$ Железо 416,79 1809 13,56 351,3 Кобальт 425,0 1765 15,36 382,7 Никель 423,7 1728 17.63 372,08 339,5 1356 13,063 304,80 Мель 932 293,9 Алюминий 314,0 10,676

Таблица 2



аналогична выпрямляющему контакту металл—полупроводник [6]. В этом случае одно из трущихся тел должно быть полупроводником и отрицательный заряд будет лучше удерживаться на металлической поверхности одного из двух тел. Полагаем, совсем не обязательно, чтобы при наличии неравенства $\chi_{\scriptscriptstyle \rm I} > \chi_{\scriptscriptstyle \rm M}$ поверхность диэлектрика непременно заряжалась отрицательно, а металла — положительно. При электризации трением (или любой другой) должна происходить утечка свободных зарядов обоих знаков в окружающую среду. В диэлектрик наряду с электронами эмитируются и катионы металла. Если утечка электронов происходит быстрее, а катионы металла могут удерживаться в диэлектрике за счет образования координационных связей, то полюсовка при электризации может измениться: на диэлектрике появится "плюс", а на металле — "минус".

Заключение

Построена общая энергетическая диаграмма процессов возбуждения и дезактивации возбужденных трением состояний для системы металлических трущихся тел с адсорбированными на их поверхностях органическими соединениями.

Библиографический список

1. **Колесников В.И., Булгаревич С.Б., Бойко М.В., Фейзова В.А.** Механоактивация при фрикционных

- взаимодействиях и законы трения скольжения и качения // Трение и износ. 2011. Т. 32. № 6. С. 489—495.
- 2. **Панченков Г.М., Лебедев В.П.** Химическая кинетика и катализ. М.: Химия, 1974. 591 с.
- 3. **Даниэльс Ф., Олберти Р.** Физическая химия. М.: Мир, 1978, 645 с.
- 4. **Акимова Е.Е., Булгаревич С.Б., Бойко М.В.** Термодинамика несамопроизвольных химических реакций, инициируемых трением // Вестник РГУПС. 2006. Т. 23. № 3. С. 107—112.
- 5. **Колесников В.И., Булгаревич С.Б., Бойко М.В., Корец К.Е.** Заселенность переходных состояний химических процессов, активированных трением // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 4. С. 385—393.
- 6. **Епифанов Г.И., Моха Ю.А.** Физические основы конструирования и технологии РЭА и ЭВА: учеб. пособие для вузов. М.: Советское радио, 1979. 352 с.
- 7. **Исследование** состава нефти и нефтепродуктов. [Электронный ресурс]. URL: http://www.neftemagnat.ru/enc/292
- 8. Справочные таблицы и схемы для учебы и работы. [Электронный ресурс]. URL: http://infotables.ru/fizika/132-rabota-vykhoda-elektronov-iz-metallov-tablitsa
- 9. **Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.** Статистическая физика. М.: Наука, 1964. 567 с.
- 10. **Гордон А., Форд Р.** Спутник химика. М.: Мир, 1976. 541 с.
- 11. **Новиков И.И.** Дефекты кристаллического строения металлов. М.: Металлургия, 1975. 208 с.
- 12. Колесников В.И., Булгаревич С.Б. Некоторые аспекты аналитических исследований трибоэлектризации и диффузии в металлополимерных трибосистемах // Вестник РГУПС. 2015. № 4. С. 137—147.





Читайте в следующем номере:

Любишкина О.В., Курнасова Я.Л. Оптимизация времени сборки специальных изделий с использованием теории графов

Вавилов В.Е. Новый метод проектирования электромеханических преобразователей энергии с использованием генетических алгоритмов

Федоров В.А., Калмыков В.В., Малышев Е.Н. Применение крючковых бункерных загрузочноориентирующих устройств в многономенклатурном сборочном производстве

Дубовик Е.А. Сборка и разборка шатунно-поршневой группы машин

Кохановский В.А., Иванов С.И., Петренко А.А. Конструкция антифрикционных фторопластсодержащих композиционных покрытий

Иванова Т.В., Налабордин Д.Г. Сравнительная оценка интенсивности износа гребней стандартных и инновационных колес грузовых вагонов

Мукутадзе М.А., Лагунова Е.О., Гармонина А.Н. Расчетная модель упорного подшипника с податливой опорной поверхностью

Салахов Т.З., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г. Увеличение эффективности технического обслуживания промышленного оборудования на основе анализа состояния масла



УДК 621.892

И.И. Емаев, Н.К. Криони, д-р техн. наук, **Р.Г. Нигматуллин,** д-р техн. наук, **Л.Ш. Шустер,** д-р техн. наук (Уфимский государственный авиационный технический университет) E-mail: OKMiM@ugatu.ac.ru, nigmatullin@himmotolog.ru

Влияние состояния модификатора на триботехнические характеристики пластичной смазки в различных температурносиловых условиях трения

Показано, что активные компоненты углеродного каркаса, используемого в качестве комплексной добавки в пластичную смазку на основе цилиндрового масла, до температуры 350...400 °C оказывают благоприятное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия при трении благодаря низкой пластичности зоны фрикционного контакта, а при более высоких температурах происходит термическая деструкция этих компонентов углеродного каркаса.

It is shown that active components of the carbon framework used as complex additive in plastic lubricant on the basis of cylinder oil up to the temperature of 350...400 °C exert beneficial effect on characteristics of adhesive interaction at friction thanks to low plasticity of a zone of frictional contact, and at more high temperature there is a thermal destruction of these components of a carbon framework.

Ключевые слова: пластичная смазка, углеродный каркас, нагрузка сваривания, критическая нагрузка, пятно износа, прочность адгезионных связей на срез, давление, температура.

Keywords: plastic lubrication, carbonic carcass, loading weldability, critical load, wear spot, strength of adhesive communications on shear, pressure, temperature.

Введение

Смазка узлов трения любого назначения обеспечивает снижение трения сопряженных деталей, уменьшение износа и предотвращение заедания, отвод тепла из зоны контакта, нагреваемой в процессе трения, унос продуктов износа из этой зоны, защиту поверхностей трения и других элементов конструкции узла трения от коррозионного воздействия внешней среды. Кроме того, смазочные материалы уплотняют зазоры между сопряженными деталями и удаляют из зоны трения продукты износа и коррозии.

В современных машинах и механизмах существует много подвижных сопряжений, для смазывания которых сложно использовать жидкие смазочные материалы (масла). Если трудно обеспечить герметичность узла трения, нерационально непрерывно подавать масло к поверхностям трения, необходимо уменьшить удельный расход смазочного материала и увеличить срок его смены вплоть до одноразовой закладки в узел трения на весь ресурс работы, то в каче-

стве смазочного материала применяют пластичную смазку (ПС). ПС — густой мазеобразный продукт, который прочно прилипает к рабочим поверхностям элементов узла трения и хорошо удерживается на них, не сбрасывается инерционными силами при движении, обеспечивая в то же время полноценное смазывание трущихся поверхностей [1]. Эти достоинства ПС обусловлены их структурой и составом. ПС обычно рассматриваются как высокоструктурированные тиксотропные дисперсии твердого загущения в жидкой среде [2]. Иначе говоря, загуститель образует структурный каркас, который удерживает связанную с ним дисперсную среду.

Как правило, ПС состоят из трех компонентов — масла (дисперсионной среды), загустителя (дисперсионной фазы) и добавки (маслонерастворимые присадки, твердые добавки и их композиции) — для повышения уровня функциональных свойств. Если в качестве дисперсной среды используют высоковязкое масло (цилиндровое масло), то ПС может функционировать без загустителя, т.е. углеводородная ПС,



в которой загустителем являются твердые углеводороды (например, парафины), находящиеся в масле [3].

Применение углеродного каркаса (УК) в качестве добавки взамен дисульфида молибдена обеспечивает более благоприятные противозадирные и равные противоизносные характеристики ПС. УК — побочный продукт переработки нефти содержит в связанном виде химические элементы, повышающие противозадирные и противоизносные свойства ПС (алюминий, серу, хлор, углерод и т.д.). При этом остается неясным, насколько важно, чтобы эти химические элементы находились в зоне трения в связанном состоянии, т.е. составляли некую композицию, комплекс (естественный углеродный каркас), а не как отдельные химические элементы (искусственный углеродный каркас) [3].

Цель работы — исследование триботехнических характеристик ПС, модифицированных естественным углеродным каркасом (ЕУК) и искусственным углеродным каркасом (ИУК), составленным из набора химических элементов и соединений, с учетом давления и температуры на контактных поверхностях.

Методика исследования

Противоизносные и противозадирные свойства ПС исследовали на четырехшариковой машине (ЧШМ) по ГОСТ 9490—75. Показателем противоизносных свойств служил диаметр пятна износа $D_{\rm u}$, который вычисляли как среднее арифметическое значение диаметров пятен износа трех нижних шариков после работы ЧШМ в течение одного часа при нагрузке 0,4 кH.

Противозадирные свойства определяли по критической нагрузке задира $P_{\rm kp}$, нагрузке сваривания $P_{\rm cs}$ и индексу задира ${\rm M_3}$, которые характеризовали предельную работоспособность смазочного материала.

Для исследования адгезионного взаимодействия трущихся поверхностей на установке [4] реализована физическая модель, в первом приближении отражающая реальные условия трения и изнашивания на локальном контакте, в том числе для тяжелонагруженных трибосопряжений машин и механизмов. При этом сферический индентор (имитирующий единичную неровность пятна касания трущихся твердых тел), сдавленный двумя плоскопараллельными образцами, имеющими высокую точность и чистоту контактирующих поверхностей, вращается под нагрузкой вокруг собственной оси. Сила

 $F_{
m экс}$, необходимая для вращения индентора, связана главным образом со сдвиговой прочностью $au_{
m II}$ адгезионных связей. Установка нагревает зоны контакта и обеспечивает характерное распределение температуры по глубине контактирующих тел.

Чтобы определить зависимости прочности адгезионных связей на срез $\tau_{\rm II}$ от контактного давления $p_{\rm IR}$, необходимо знать не только действующие силы, но и изменяющиеся площади касания сферического индентора и плоского образца. При ступенчато возрастающей нагрузке эти площади определяют только расчетным путем со значительными погрешностями из-за отсутствия достоверных сведений о физико-механических свойствах приконтактных слоев, неизвестности значений коэффициента трения и влияния на него давления и т.д.

Поэтому для определения зависимости $\tau_{\Pi}(p_r)$ на подвижном фрикционном контакте использовали метод постепенно снижающихся нагрузок: от максимальных, соответствующих пластическим деформациям на контакте, до минимально возможных по точности измерительных приборов.

Суммарную массу разновесок M выбирали такой, чтобы в начале каждого опыта в месте касания индентора и образца создавался пластический контакт с радиусом отпечатка $r_{\text{отп}}$. По нему в дальнейшем определяли площадь контакта пары трения. Полагали, что при уменьшении нагрузки $N_i = M_i g \ (i \ge 5)$ площадь контакта исследуемой пары трения практически не изменяется, так как упругим восстановлением отпечатка можно пренебречь в связи с распространением пластической деформации на значительную глубину и уменьшением упругости контактирующих материалов при повышенной температуре. Фиксируемые значения τ_{Π} определяли из соотношения [4]:

$$\tau_{\Pi i} = 0,75 \frac{F_{9KC} R_{9KC}}{\pi r_{0T\Pi}^3}; i = 1, ..., 5,$$
(1)

где $F_{9\kappa ci}$ — окружная сила, приводящая во вращение индентор и соответствующая нагрузке N_i ;

 $R_{
m 9KC}$ — радиус диска, в котором закреплялся индентор;

 $r_{\text{отп}}$ — радиус отпечатка (лунки) на образцах. Из-за малых размеров лунки полагали, что контактные давления, действующие на поверхность сферы, постоянны и равны [4]:

$$p_{ri} = \frac{N_i}{\pi r_{\text{OTH}}^2}.$$
 (2)



По формулам (1) и (2) вычисляли предельные значения $\tau_{\Pi\Pi}$ и $p_{r\Pi}$, соответствующие пластическому контакту, т.е. начальной суммарной массе разновесок.

Адгезионную (молекулярную) составляющую коэффициента трения $f_{\rm T}$, соответствующую пластическому контакту, вычисляли по формуле [4]:

$$f_{\rm T} = \frac{\tau_{\rm \Pi\Pi}}{p_{r\,\rm \Pi}} = 0,75 \frac{F_{\rm 3KC}R_{\rm 3KC}}{Mgr_{\rm OT\Pi}}.$$
 (3)

Образцы для исследований представляли собой диски диаметром 20...25 мм из стали 45 и толщиной 5...7 мм, инденторы — цилиндры диаметром 5 мм со сферическими торцами ($R_{c\phi}$ = 2,5 мм). Исследуемые поверхности имели параметр шероховатости Ra=0,2...0,4 мкм. Сферический индентор радиусом 2,5 мм из инструментального сплава BK8, сжатый плоскими образцами, вращается вокруг собственной оси. Нагрев зоны контакта осуществляли электроконтактным способом.

При двух- или трехкратном повторении эксперимента вероятное отклонение τ_{Π} не превышает 5...8 %.

Перед каждым экспериментом поверхности образцов и индентора обезжиривали техническим спиртом и наносили на них слой испытываемой ПС. Все эксперименты повторяли по три раза и получали среднеарифметические результаты.

Смазочные композиции исследуемых материалов состоят из 60 % цилиндрового масла (ЦМ), 20 % литола и 20 % модифицированных добавок. В ПС (ЕУК) добавляют 20 % углеродного каркаса; в ПС (ИУК) — 8 % алюминия хлористого (ГОСТ 3758—76), 1 % серы, 91 % угля активированного.

ЦМ выбрали в качестве основы в связи с хорошей способностью равномерно распределяться по площади трения и стойкостью против окисления кислородом воздуха при высоких температурах с образованием нагара [5]. Это масло не вызывает коррозию металлических поверхностей и сохраняет текучесть при низких температурах. В исследуемых ПС использовали литол как антифрикционную многоцелевую составляющую, загущенную литиевым мылом 12 — гидроксистеариновой кислоты [5].

При приготовлении ПС (ЕУК) хорошо высушенный в печи углеродный каркас предварительно тщательно перемалывали в ступе до состояния мельчайшего порошка и перемешивали с ЦМ и литолом до пастообразного состояния. Аналогичным образом получали ПС (ИУК).

Результаты исследования и их обсуждение

Полученные экспериментальные результаты по противозадирным и противоизносным характеристикам испытываемых ПС приведены в таблице.

 Π С (EУК) обеспечивает более благоприятные противозадирные триботехнические характеристики по сравнению с Π С (ИУК) на 13...26 %. Значения противоизносной характеристики $D_{\rm u}$ у них практически одинаковые.

На рис. 1 приведены температурные зависимости предельных величин $p_{r\Pi}$, $\tau_{\Pi\Pi}$, $\tau_{\Pi\Pi}/p_{r\Pi}$, соответствующих пластическим деформациям на фрикционном контакте.

Противозадирные и противоизносные характеристики смазочных материалов

Смазочный	Триботехнические характеристики			
материал	$P_{\rm \kappa p}$, H	$P_{\rm cB}$, H	И ₃ , Н	$D_{\rm M}$, мм
ПС (ЕУК)	1060	5000	94,55	0,64
ПС (ИУК)	940	3150	71,76	0,65

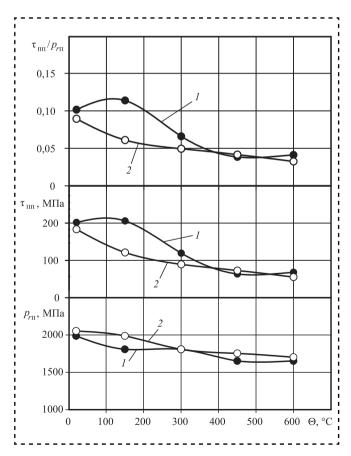


Рис. 1. Влияние температуры на триботехнические характеристики пары BK8 — сталь 45 при использовании ПС, модифицированной:

1 - ИУС; 2 - ЕУК



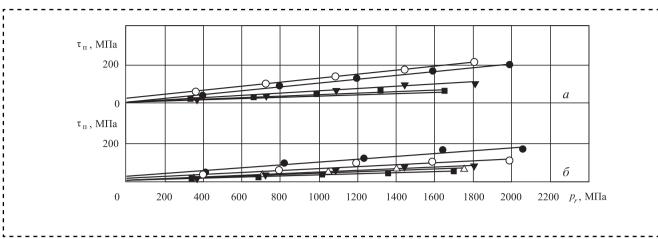


Рис. 2. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей на различных температурах фрикционного контакта при использовании ПС, модифицированной:

До температуры контакта 350...400 °С ПС (ЕУК) обеспечивает существенно лучшие триботехнические характеристики по сравнению с ПС (ИУК).

Рассмотрим более подробно совместное влияние температуры и давления на характеристики адгезионного взаимодействия при трении. Для исследованных пар трения зависимость прочности τ_{Π} адгезионных связей на срез от давления p_r на контакте в исследованном диапазоне температур имеет прямо пропорциональный характер и описывается биномиальной функцией (рис. 2):

$$\tau_{\Pi} = \tau_0 + \beta_{ri}, \tag{4}$$

где τ_0 — прочность адгезионных связей на срез при отсутствии контактного давления;

 β — коэффициент упрочнения адгезионных связей от давления на контакте.

Смазочный материал и температура контакта существенно влияют на фрикционные параметры τ_0 и β (рис. 3), которые изменяют прочность τ_{π} и молекулярную (адгезионную) составляющую коэффициента трения:

$$f_{\rm T} = \tau_{\rm TI}/p_r = \tau_0/p_r + \beta.$$
 (5)

Гидродинамическая аналогия устанавливает линейный характер зависимости τ_{Π} от контактного давления (4) с температурными зависимостями параметров [6]:

$$\beta = \frac{C_1 \Delta A}{R\Theta};\tag{6}$$

$$\tau_0 = C_1 \left(1 + \frac{E}{R\Theta} \right), \tag{7}$$

где C_1 — константа;

R — постоянная Больцмана;

 Θ — температура контакта;

E — энергия активации вязкого течения фрикционного контакта;

 ΔA — приращение объема зоны контакта, связанное с необходимостью образования некоторого зазора для разрыва образовавшихся связей и зависящее от пластичности так называемого "третьего тела" [6] — зоны контакта.

Повышение температуры контакта приводит к изменению τ_0 (7), коэффициента упрочнения адгезионных связей β (6), а также — в условиях пластического контакта — предельного давления $p_{r\Pi}$, связанного с твердостью более мягкого материала из контактирующих тел фрикционной пары.

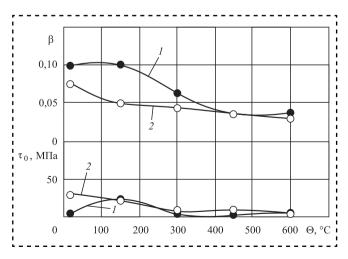


Рис. 3. Влияние температуры на τ_0 и β фрикционного контакта BK8 — сталь 45 при использовании ПС, модифицированной:

1 - ИУС; 2 - ЕУК



Прочность адгезионных связей на срез зависит не только от контактного давления p_r , но и от пластичности "третьего тела", энергии активации его вязкого течения, а также от температуры, которая оказывает как прямое, так и косвенное воздействие (через изменение величины ΔA) на рассматриваемые параметры.

Применение в качестве добавки ЕУК и ИУК практически не изменяет энергию активации вязкого течения "третьего тела" (на рис. 3 экспериментальные точки по τ_0 практически совпадают).

При сравнительно невысоких температурах контакта (до 350...400 °C) добавка ИУК в ПС повышает пластичность "третьего тела", образовавшегося в зоне контакта, что увеличивает параметр β (см. рис. 3), а также величины $\tau_{\Pi\Pi}$ и $\tau_{\Pi\Pi}/p_{r\Pi}$ (см. рис. 1).

При температурах 350...400 °С и выше в добавке ЕУК при трении происходит термическая деструкция активных компонентов углеродного каркаса, используемого в качестве комплексной добавки в ПС (ЕУК), в результате чего экспериментальные точки по β , $\tau_{\text{пп}}$ и $\tau_{\text{пп}}/p_{r\text{п}}$ для ПС (ЕУК) и ПС (ИУК) практически совпадают.

Выводы

1. Активные компоненты естественного углеродного каркаса, используемого в качестве ком-

плексной добавки в ПС, оказывает благоприятное влияние на характеристики адгезионного взаимодействия при трении благодаря низкой пластичности зоны фрикционного контакта.

2. При температурах выше 350...400 °C происходит термическая деструкция активных компонентов естественного углеродного каркаса и триботехнические характеристики ПС (ЕУК) и ПУ (ИУК) практически выравниваются.

Библиографический список

- 1. Доценко А.И., Буяновский И.А. Основы триботехники: учебник. М.: ИНФРА-М, 2014. 336 с.
- 2. **Фукс И.Г., Шибряев С.Б.** Состав, свойства и применение пластичных смазок. М.: ГАНГ им. Губкина, 1992. 157 с.
- 3. **Вопросы** модификации пластичных смазочных материалов углеродным каркасом / И.И. Емаев и др. // Кузнечно-штамповочное производство. 2016. № 4. C. 39—42.
- 4. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 198 с.
- 5. **Топлива,** смазочные материалы, технические жидкости: справочник / под ред. В.М. Школьникова. М.: Издательский центр "Техинформ", 1999. 596 с.
- 6. **Крагельский И.В., Любарский И.М., Гусля- ков А.А.** Трение и износ в вакууме. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.







ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

> 107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2 Тел.: 8 (495) 785-60-69

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



УДК 620.178.162.42

Н.М. Русин, канд. техн. наук

(Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН, г. Томск),

А.Л. Скоренцев, И.В. Власов, канд. техн. наук

(Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения РАН.

г. Томск, Томский политехнический университет)

E-mail: skoralexan@mail.ru

Формирование слоя переноса при сухом трении сплава AI—Sn по стали*

Проведено исследование структуры и состава дорожки трения, образующейся при сухом трибологическом контакте образца AI—30Sn со сталью при постоянной скорости скольжения и давлении. Обнаружено, что в процессе формирования слоя переноса число частиц и их размеры увеличиваются и достигают некоторых равновесных значений, означающих окончание периода притирки и начало стационарного режима трения. Одновременно растет удельная сила трения между контртелами и также достигает квазипостоянного значения. Слой переноса отличается высоким содержанием кислорода и малым содержанием олова, которое еще в начале испытаний расплавляется и перетекает из образца на поверхность стального диска. Большая часть его истирается образцом, а остатки располагаются между частицами слоя переноса. В отсутствие жидкой смазки сила трения сплавов AI—Sn по стали определяется особенностями взаимодействия слоя переноса и слоем сильнодеформированного материала на поверхности алюминиевого образца.

Investigation of the structure and composition of the friction track formed during tribological contact between the specimen Al—30Sn and steel without lubrication at contact sliding speed and pressure was been made. Discovered that in the process of formation of a layer of transfer the number of particles and their size increases in the process of friction and reach some equilibrium values, meaning the end of the setting-in period and the beginning of the stationary modes of friction. Simultaneously with each movement of the specific frictional force between the counter-bodies and also in the magnitude of the quasi-constant value. The transport layer was been characterized by high oxygen contant and low content of tin, wich is melted at the beginning of the test and flows from the sample to the surface of the sleel disc. Most of it was been worn by the sample, and the remainders are located between the particles of the transfer layer. In the absence of liquid lubrication, the friction force of Al—Sn alloys over steel was been determined by the features of the interaction of the transport layer and the layer of highly deformed material on the surface of the aluminum sampe.

Ключевые слова: сухое трение, сплав Al—Sn, слой переноса.

Keywords: dry friction, Al—Sn alloy, transferred layer.

Введение

Широкому использованию в триботехнике алюминиевых сплавов препятствует их высокая склонность к схватыванию при граничном трении. Давление схватывания повышается тем заметнее, чем выше в алюминии концентрация одного из легкоплавких металлов: Ві,

Сd, Pb, Sn. Данный эффект обусловлен способностью этих элементов исполнять роль твердой смазки в случае дефицита масла на поверхности трения. На практике чаще всего в качестве антифрикционной добавки используют олово, а сплавы Al—Sn применяют как самосмазывающиеся покрытия подшипниковых вкладышей (ГОСТ 14113—78).

Олово имеет более низкий, чем алюминий, предел текучести и не упрочняется, поэтому оно легко выдавливается из алюминиевой матрицы

^{*} Работа выполнена в рамках проекта СО РАН (программа III.23.2.4) при частичном финансировании по проектам РФФИ № 16-08-00603 и № 16-38-00236.



при ее расширении вследствие нагрева и размазывается по поверхности трения. Еще более интенсивно олово выдавливается при расплавлении (232 °C), так как при этом не только резко увеличивается его объем (на 2,6 %), но и коэффициент термического расширения у расплава больше, чем у твердого металла. Угол смачивания твердого алюминия жидким оловом более 100° и начинает резко снижаться только при температуре выше 600 °C [1], поэтому даже расплавленное олово не образует на поверхности композиционного материала (КМ) Al—Sn прочное покрытие, эффективно препятствующее непосредственному контакту алюминия со сталью.

Если толстый слой олова на дорожке трения при сухом трении оловянного образца по стали периодически не возобновлять, то он быстро истирается.

При трении KM Al—Sn по стали олово также переносится на поверхность контртела и покрывает ее постоянно возобновляемой инертной пленкой, предотвращающей схватывание с алюминием. На стадии стационарного трения спеченных сплавов Al—Sn по сухой стали олово всегда присутствует на дорожке трения, хотя и в меньших, чем в исходном сплаве концентрациях [2]. Возможно, что сильное легирование перенесенного слоя элементами подложки и атомами окружающей атмосферы придает ему антифрикционные свойства с эффектом твердой смазки [3], так как кислород не растворяется в твердом алюминии и олове и, следовательно, может присутствовать здесь только в виде твердых оксидов [2]. Из-за высокой твердости они не являются элементами твердой смазки, но могут плакировать поверхность трения и препятствовать схватыванию сопряженных деталей [4].

Механизм участия олова в предотвращении схватывания между алюминиевым образцом и стальным контртелом подробно не исследован, что не позволяет априори определить оптимальное количество твердой смазки и других легирующих элементов при проектировании новых антифрикционных износостойких материалов на основе алюминия.

Цель работы — исследование особенностей формирования слоя переноса на поверхности стального контртела в зависимости от длительности сухого трения по нему образцов состава Al—30Sn.

Материалы и методика проведения эксперимента

Образцы сплава Al—30Sn получали жидкофазным спеканием смеси мелких порошков алюминия и олова [Пат. RU 2552208. Способ получения износостойкого антифрикционного сплава / Н.М. Русин, А.Л. Скоренцев; 10.06.2015]. Их структура представлена двумя взаимно нерастворимыми твердыми фазами. Спеченные заготовки подвергали двукратному равноканальному угловому прессованию (РКУП) для уменьшения их остаточной пористости и упрочнения матрицы. Пористость спеченных заготовок после обработки не превышала 1 %. Использование при РКУП маршрута А позволило также преобразовать структуру поверхности трения образцов к слоистому виду и за счет утонения алюминиевых зерен сократить расстояние между включениями олова как источниками смазки.

Из спеченных и прессованных заготовок вырезали образцы сечением 3×3 мм, торцевая плоскость которых совпадала с положением плоскости течения при РКУП. Поверхность трения образцов шлифовали на мелкой наждачной бумаге и полировали на сукне с алмазной пастой, размер абразивных частиц в которой не превышал 1 мкм. Такой же обработке подвергали поверхность диска (контртела) из закаленной малоуглеродистой стали. Перед началом испытаний полированные поверхности диска и образца протирали ацетоном.

Испытания проводили по схеме "палец—диск" на приборе марки Tribotechnic (Франция). Давление образцов на диск p=1 МПа. Скорость скольжения v_{ck} поддерживали постоянной, независимо от радиуса дорожки трения. Поверхность трения образцов, обработанных методом РКУП (A), сориентирована так, чтобы направление скольжения было перпендикулярно прослойкам Al- и Sn-фаз.

После прохождения образцами заданного пути трения поверхности трения образца и контртела исследовали с помощью микроскопов: оптического AXIOVERT-200MAT (Zeiss, Германия) и электронного LEO EVA 50 со встроенным микроанализатором (ЦКП "НАНОТЕХ" ИФПМ СО РАН), а также сканирующего интерференционного микроскопа белого света Zygo NewView 6200.



Результаты эксперимента и их обсуждение

Исходная структура образцов Al—30Sn после спекания представляет собой непрерывную сеть алюминиевых зерен темного цвета со светлыми прослойками олова на границах (рис. 1). При контакте с твердым диском выступающие над поверхностью образца неровности плющатся, и вдавливаемый материал упрочняется. Если нагрузка мала, а таких выступов много, то вдавливание происходит не до конца (см. рис. 1, a). Поверхностные неровности твердого контртела не плющатся, а внедряются в поверхность образца и при скольжении оставляют на ней канавки, оттесняя материал на сторону, и частично увлекая его с собой. При встрече с упрочненной областью глубина внедрения неровностей резко уменьшается, а напряжение сдвига материала возрастает. На границе области возникают нагромождения из вовлеченного в сдвиг материала (см. рис. $1, \delta$).

Такие нагромождения образуются до тех пор, пока поверхность образца не износится на глубину упрочнения материала при вдавливании выступов. Чтобы механические свойства поверхности трения сделать более однородными, спеченные образцы подвергали обработке методом РКУП по маршруту А. В ходе такой обработки композиты Al—Sn практически перестают упрочняться уже после второго прессования, и их прочность остается неизменной при последующих деформациях [5]. Поэтому внедрившиеся неровности стального контртела при своем движении встречают со стороны образца всегда равное сопротивление, в том числе и на границе областей вдавливания.

Одновременно с упрочнением КМ при РКУП меняется и их макроструктура, зерна вытягиваются в направлении течения материала и сжимаются в перпендикулярном направлении. При

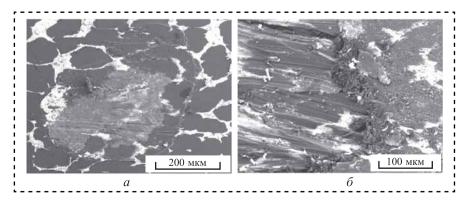


Рис. 1. Структура поверхности трения спеченного образца Al—30Sn после 1 (a) и 10 (б) проходов по стальному контртелу: ${\rm v_{ck}}=0.07~{\rm m/c}$

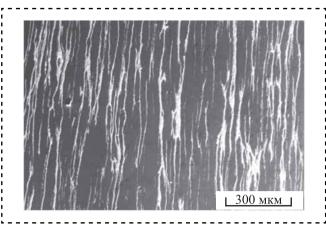


Рис. 2. Исходная структура поверхности трения композита Al—30Sn после двух РКУП маршрутом A

использовании маршрута A, когда плоскость и направление течения материала не меняются, алюминиевые зерна в такой плоскости превращаются в тонкие вытянутые полосы. Соответственно, утоняются и расположенные на их границах оловянные включения (рис. 2).

Если из такой заготовки вырезать образцы с торцами, параллельными плоскости течения, то поворачивая образец относительно направления скольжения можно добиться ситуации, когда расстояние между оловянными полосами будет минимальным. С точки зрения "самосмазывания" КМ Al—Sn такая ориентация поверхности трения наиболее благоприятна для растаскивания по ней олова и образования им тонкой защитной пленки.

Износостойкость КМ Al—Sn после обработки методом РКУП(A) заметно улучшается, хотя сила трения их по сухой стали при этом почти не меняется [5]. Удельная (на единицу площади сечения образца) сила трения (F_{yg}) у подвергнутого двум РКУП(A) КМ Al—30Sn при прочих равных условиях почти такая же, как и у спеченного сплава (рис. 3). РКУП обработка в этом

случае привела лишь к незначительному снижению $F_{y,y}$, более быстрому завершению периода притирки и выходу на стационарный режим трения. Удельная сила трения сплавов Al—Sn мало чувствительна не только в отношении их твердости, но и объемной доли металла-смазки и величины действующего давления. Это указывает на то, что между трущимися контртелами формируется особый слой материала, свойства которого и определяют



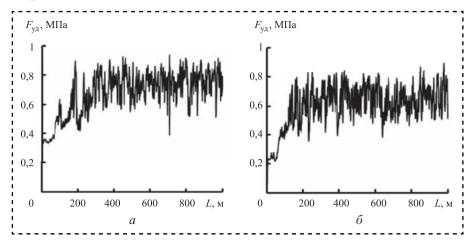


Рис. 3. Зависимость удельной силы трения $F_{\rm y_{\rm J}}$ спеченного (a) и обработанного методом РКУП(A) (б) композита Al—30Sn от пути трения по стальному диску при ${\rm v_{\rm ck}}=0.6$ м/с

силу их взаимодействия. На это же указывает и практически одинаковая амплитуда автоколебаний F_{yg} , установившаяся на стадии стационарного трения (см. рис. 3).

Однако из кривых трения на рис. З неясно, является ли такой слой самостоятельным образованием, базируется ли он на поверхности одного из контртел, или на каждом из них формируется свой слой, отличный по составу, структуре и свойствам. Для ответа на данный вопрос образец состава Al—30Sn подвергали трению по свежей поверхности диска в отсутствии жидкой смазки разное время при $v_{\rm ck}=0.07~{\rm m/c}$ и $p=1~{\rm M}\Pi{\rm a}$.

После прохождения образцом 2 м радиус дорожки трения уменьшали на 5 мм (до 10 мм), и продолжили трение, но уже с длиной пути 5 м. Затем диск переворачивали обратной стороной и проводили новое более длительное испытание (20 м), по прошествии которого радиус дорожки трения снова меняли на 5 мм, но уже в большую сторону (15 мм). Таким образом, сравнивали две пары дорожек трения, полученные практически в одинаковых внешних условиях, отличающиеся только числом прохождения по ним образца A1—30Sn (рис. 4).

В конце каждого периода испытаний на дорожке трения формировался слой из перенесенного материала. После 5 м скольжения он состоял из отдельных частиц, заполнивших неровности ямочного типа на поверхности диска, и только вблизи внутренней части дорожки сформировались полосы перенесенного слоя. После прохождения пути трения длиной 20 м полосы перенесенного материала становятся более заполненными, а после 50 м скольжения

слой перенесенного материала покрывает практически всю дорожку трения, за исключением случайных исходных глубоких царапин на поверхности диска.

Величина и темпы приращения силы трения образца по стальному диску на дорожках длиной 20 и 50 м практически совпали. Порядок и интенсивность процесса образования слоя перенесенного материала на каждой дорожке трения практически повторялись. Сила трения между контртелами по мере увеличения длины пути трения от 0 до 40 м плавно растет, а затем ее рост

несколько ускоряется и $F_{yд}$ быстро достигает некоторого квазистационарного значения. Видимо, после данного числа (около 500) оборотов диска на дорожке трения практически не остается свободных участков для нового перенесенного материала. Поэтому дальнейшее увеличение длины пути трения не влияет на $F_{yл}$ (см. рис. 3).

Более детально структуру перенесенного слоя в конце каждого отличающегося продолжительностью этапа трения можно рассмотреть при больших увеличениях. На рис. 5 (стр. 2 обл.) фотографии соответствуют дорожкам трения образца Al—30Sn по поверхности стального диска длиной 2, 5, 20, 50 и 1000 м, что эквивалентно 21, 80, 320, 530 и 12 500 оборотам диска соответственно.

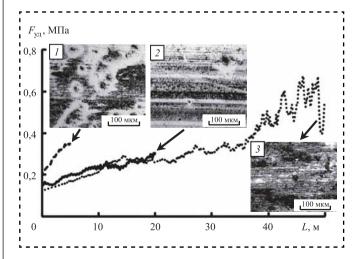


Рис. 4. Влияние длины пути трения на удельную силу трения обработанного методом РКУП(A) образца Al—30Sn (p=1 МПа, $v_{ck}=0.07$ м/c). Путь трения, м: 1-5; 2-20; 3-50



Первые небольшие частицы перенесенного материала появляются на диске в местах дефектов его поверхности практически сразу после начала фрикционного контакта со сплавом Al—30Sn (темные и светло-голубые, покрытые тонкой пленкой оксида олова, частицы с участками поверхности диска серого цвета). По мере увеличения числа проходов образца по дорожке трения число и размеры частиц растут, но полностью не покрывают поверхность дорожки даже после прохода образца по ней 12 500 раз (рис. 5, д).

Олово на дорожку трения переносится не только с прилипшими частицами образца, но и отдельно в больших количествах (см. рис. 5, δ). Уже через 5 м непрерывного скольжения образца A1—30Sn по стали его поверхностные слои разогреваются настолько, что олово начинает плавиться. Поскольку при температуре ниже 600 °C расплавленное олово плохо смачивает алюминий [4], то оно вытекает из образца на поверхность диска.

Олово хорошо смачивает стальные поверхности, но для его растекания требуется некоторое время, которого в нашем случае не хватает, поскольку схема испытаний обусловливает перио-

дический, но кратковременный контакт образца с конкретным участком дорожки трения. За время между контактами поверхность участка успевает охладиться. О неполном смачивании оловом поверхности дорожки трения свидетельствует и форма оловянных частиц в виде шариков на рис. 5, δ .

Структура участка дорожки трения после прохождения образца A1—30Sn по нему 530 раз на рис. 6 согласуется со структурой дорожки трения на рис. 5.

Толстый слой олова на дорожке не может удержаться из-за плохого смачивания и постоянного абразивного воздействия со стороны образца (см. рис. 6, *a*). Вырванные с поверхности образца частицы износа перед тем как прилипнуть к стальному контртелу, некоторое время пропахивают и царапают его поверхность, так как частицы содержат много твердых оксидов (таблица).

На полученных с помощью сканирующего интерференционного микроскопа изображениях видно, что практически с начала фрикционного контакта КМ Al—Sn с полированным стальным диском на поверхности последнего появляются

мельчайшие частицы, перенесенные с поверхности образца (рис. 7 на стр. 2 обл.). Их число растет, и уже после 20 м скольжения образца (примерно 320 оборотов) на дорожках трения формируются целые полосы, поверхность которых оказывается покрытой тонким слоем перенесенного материала. В это же время на дорожке трения появляются первые царапины, глубина и ширина которых растет по мере продолжения фрикционного контакта. Причем глубина их превосходит толщину перенесенного слоя, т. е. абразивные частицы царапают лежащий под ним твердый стальной диск. Когда на пути абразивной частицы встречается толстый нарост, она повреждает лишь его поверхность. Алюминиевые частицы перенесенного слоя действительно достаточно твердые и защищают поверхность стального контртела от абразивного износа. Однако

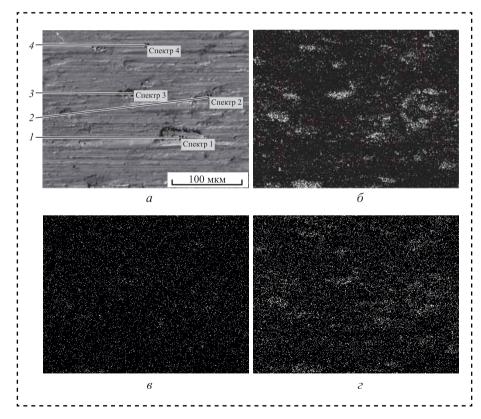


Рис. 6. Электронно-микроскопическое (a), а также в характеристических лучах алюминия (б), олова (в) и кислорода (г) изображение участка дорожки трения образца Al—30Sn (2 PKУП(A)) после 530 оборотов диска (p=1 МПа, $v_{\rm ck}=0.07$ м/с)



Массовая доля элементов в различных областях (рис. 6) дорожки трения, %

Спектр	О	Al	Fe	Sn
1	4,33	3,44	91,89	0,35
2	28,70	24,90	40,53	5,87
3	9,43	7,95	80,41	2,21
4	3,90	1,96	93,98	0,16

такими защитными свойствами обладают только крупные частицы, а мелкие — сдираются образующимся на поверхности трения абразивом. Поэтому сплошной тонкий слой переноса, который образовался на дорожке трения в начале фрикционного контакта, исчезает, так как оказывается тоньше глубины внедрения закрепленных на поверхности трения образца Al—30Sn абразивных частиц износа (см. рис. 7, в).

После прохождения образца по поверхности диска около 500 раз на дорожке трения формируется рельеф, состоящий из крупных частиц переноса и располагающихся между ними царапин. Перенесенные частицы постепенно изнашиваются, но рядом возникают новые и таким образом их число поддерживается примерно постоянным при прочих равных условиях эксперимента. Достижение динамического равновесия плотности перенесенного слоя на дорожке трения означает выход фрикционной системы на стадию стационарного трения и характеризуется постоянством силы трения между сопряженными контртелами.

Выводы

При сухом трении с началом фрикционного контакта образцов сплава Al—30Sn со сталью наблюдали перенос материала испытываемого композита на дорожку трения.

Число частиц перенесенного материала, как и их размер, возрастают с увеличением времени испытания и достигают квазипостоянной величины примерно через 500 оборотов диска.

Одновременно с ростом числа частиц переноса и их размера увеличивается удельная сила трения образца Al—30Sn по стальному диску. Рост силы трения при неизменных условиях достигает своего максимума одновременно с окончанием формирования слоя перенесенного материала.

Библиографический список

- 1. **Политермы углов** смачивания алюминия и алюминий-литиевого сплава расплавами на основе олова / Н.В. Далакова и др. // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2014. № 4. С. 60—63.
- 2. Rusin N.M., Skorentsev A.L., Kolubaev E.A. Structure and Tribotechnical Properties of Al—Sn Alloys Prepared by the Method of Liquid-Phase Sintering // Advanced Materials Research. 2014. V. 1040. P. 166—170.
- 3. **Курбаткин И.И., Муравьева Т.И.** Структурные исследования поверхности контакта после трибологических испытаний // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 8. С. 3—7.
- 4. **Чуфистов О.Е., Чуфистов Е.А., Артемьев В.П.** Технологии, строение и свойства покрытий, формируемых методами анодного оксидирования на алюминии и его сплавах // Цветные металлы. 2009. № 10. С. 57—61.
- 5. **Rusin N.M., Skorenzev A.L., Mishin I.P.** Evolution of structure and properties of Al—Sn composites under deformation // Inorganic Materials: Applied Research. 2015. V. 6. No. 5. P. 427—437.





УДК 621.5

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

Перевод гармонических колебаний в состояние покоя

Рассмотрена система со свободными или затухающими гармоническими колебаниями. Для перевода этой системы в состояние покоя в заданный момент времени вводится управляющее воздействие, зависящее только от времени, структура и параметры которого определены на основе методов теории оптимального управления.

System with the free or damped harmonic oscillations are considered. It is necessary to transfer the system to a standstill at a predetermined time for which the control action was been introduced, depending only on the time. The structure and parameters of the manipulated variable determined on the basis of methods of optimal control theory.

Ключевые слова: гармонические колебания, состояние покоя, управляющее воздействие, метод множителей Лагранжа, вынужденные колебания, интенсивность.

Keywords: harmonic oscillations, resting state, control action, method of Lagrange multipliers, forced vibrations, intensity.

Гармонические колебания — простейший вид колебательного движения.

Любые периодические колебания, наблюдаемые в природе и технике, можно представить как наложение нескольких гармонических колебательных движений.

В системе управления гармоническими колебаниями важнейшей задачей является определение необходимых управляющих воздействий для перевода колебаниий из одного состояния в другое. "Вот простой пример: нужно как можно быстрее остановить колебания (скажем, остановить качели), прикладывая свою невеликую силу то с одной стороны, то с другой. Переходить с одной стороны на другую придется многократно. По какому правилу это делать? Понятно, что качели могут быть и финансовыми, и экономическими, и физикотехническими..." [1].

Необходимое управляющее воздействие для решения задачи перевода гармонического колебания в состояние покоя за любое заданное время определяли с помощью одного из методов оптимального управления (метода множителей Лагранжа [2]).

Рассмотрим динамику одномассовой механической системы:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + 2\gamma \dot{x} = 0, \tag{1}$$

где \ddot{x} — ускорение;

 $\omega_0^2 x$ — составляющая упругой силы;

 $2\gamma\dot{x}$ — составляющая силы вязкого трения;

 ω_0 — собственная частота колебаний;

у — коэффициент затухания силы трения.

Система описывает как собственные (свободные), так и затухающие гармонические колебания. Необходимо перевести систему в состояние покоя в момент времени t=T, причем для затухающих колебаний это время должно быть меньше времени затухания.

Введем в систему (1) управляющее воздействие u(t), зависящее только от времени. Колебания под воздействием u(t) называются вынужденными.

Система (1) в таком случае буде выглядеть так:

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + 2\gamma \dot{x} = u(t). \tag{2}$$

Приведем подробный алгоритм перевода свободных гармонических колебаний ($\gamma=0$) в состояние покоя.

При начальных условиях $x(0) - x_0$, $\dot{x}(0) = \dot{x}_0$ решение уравнения (2) имеет вид [3]:



$$x(t) = \cos \omega_0 t \, x_0 + \frac{1}{\omega_0} \sin \omega_0 t \, \dot{x}_0 + \frac{1}{\omega_0} \int_0^t \sin \omega_0 (t - \tau) u(\tau) d\tau;$$

$$\dot{x}(t) = -\omega_0 \sin \omega_0 t \, x_0 + \frac{1}{\omega_0} \cos \omega_0 (t - \tau) u(\tau) d\tau.$$
(3)

Для перевода системы (3) в состояние покоя в момент времени t = T требуется найти закон изменения управляющей силы u(t), при котором имеют место равенства:

$$x(T) = 0; \ \dot{x}(T) = 0.$$
 (4)

Условие (4) с учетом выражений (3) в интегральной форме принимает вид:

$$\int_{0}^{T} \sin \omega_{0} (T - t) u(t) dt = -\omega_{0} \cos \omega_{0} T x_{0} - \sin \omega_{0} T \dot{x}_{0} = \alpha_{1}(T);$$

$$\int_{0}^{T} \cos \omega_{0} (T - t) u(t) dt = \omega_{0} \sin \omega_{0} T x_{0} - \cos \omega_{0} T \dot{x}_{0} = \alpha_{2}(T).$$
(5)

Необходимо найти такой закон управляющего воздействия $u^*(t)$, который минимизирует функционал интегральной интенсивности воздействия

$$V(u) = \frac{1}{2} \int_{0}^{T} u^{2} dt,$$
 (6)

и при этом удовлетворяет линейным (изопериметрическим) условиям (5).

Для решения такой задачи используем метод множителей Лагранжа. Сформируем расширенный функционал

$$\tilde{V}(u) =$$

$$= \int_{0}^{T} \left[\frac{1}{2} u^{2} - \lambda_{1} \sin \omega_{0} (T - t) u - \lambda_{2} \cos \omega_{0} (t - \tau) u \right] dt,$$
(7)

где λ_1 , λ_2 — подлежащие определению множители Лагранжа.

Дальнейшая процедура определения закона управляющего воздействия состоит из трех шагов:

1. Определение общей структуры закона путем дифференцирования подынтегрального

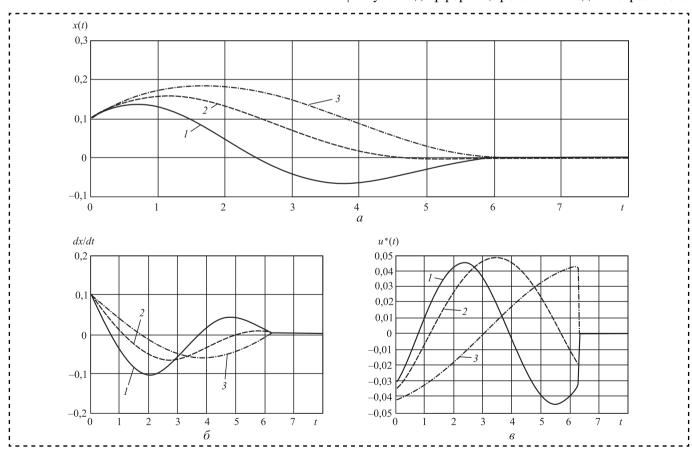


Рис. 1. Зависимости координаты x(t) (a), скорости $\dot{x}(t)$ (б), закона управляющего воздействия $u^*(t)$ (в) свободных колебаний по времени для $\omega_0 = 1.0$; 0.7; 0.4; T = 6.28:

 $1-\omega_0=1.0;\;\lambda_1=-0.03173;\;\lambda_2=-0.03196;\;V=0.006369;\;2-\omega_0=0.7;\;\lambda_1=0.04408;\;\lambda_2=-0.01905;\;V=0.005824;\;3-\omega_0=0.4;\;\lambda_1=-0.01211;\;\lambda_2=0.04307;\;V=0.004817$



выражения (7) по функции (*u*) и приравнивания полученного выражения нулю:

$$u_0(t) = \lambda_1 \sin \omega_0 (T - t) + \lambda_2 \cos \omega_0 (T - t). \tag{8}$$

2. Получение системы двух линейных алгебраических уравнений относительно множителей Лагранжа λ_1 , λ_2 путем подстановки выражения (8) $u_0(t)$ в равенства (5):

$$\left[\int_{0}^{T} \sin^{2} \omega_{0} (T - t) dt\right] \lambda_{1} +
+ \left[\int_{0}^{T} \sin \omega_{0} (T - t) \cos \omega_{0} (T - t) dt\right] \lambda_{2} = \alpha_{1} (T);$$

$$\left[\int_{0}^{T} \sin \omega_{0} (T - t) \cos \omega_{0} (T - t) dt\right] \lambda_{1} +
+ \left[\int_{0}^{T} \cos^{2} \omega_{0} (T - t) dt\right] \lambda_{2} = \alpha_{2} (T).$$
(9)

3. Решив систему уравнений (9) и обозначив полученное решение через λ_1^* , λ_2^* , получим окончательное выражение для закона управляющего воздействия $u^*(t)$, приводящее гармоническое колебание в состояние покоя:

$$u^{*}(t) = \begin{cases} \lambda_{1}^{*} \sin \omega_{0} (T - t) + \lambda_{2}^{*} \cos \omega_{0} (T - t), & t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases}$$
 (10)

Вычислительный алгоритм решения задачи состоит из следующих этапов:

- 1. Задание начальных условий и параметров: x_0 , \dot{x}_0 , T, ω_0 .
- 2. Расчет множителей Лагранжа λ_1^* , λ_2^* решение системы двух линейных алгебраических уравнений (9).
- 3. Решение дифференциального уравнения (2) с законом управляющего воздействия $u^*(t)$ (10).
- 4. Расчет интегральной интенсивности воздействия V(u) по формуле (6).

Численные расчеты проводили при следующих начальных условиях: x(0) = 0.1; $\dot{x}(0) = 0.1$; $T = 2\pi$.

На рис. 1 приведены графики изменения параметров колебаний: координаты x(t), скорости $\dot{x}(t)$, закона управляющего воздействия $u^*(t)$ по времени для трех значений собственных частот колебаний $\omega_0 = 1,0,\,0,7,\,0,4$, а также расчетные значения множителей Лагранжа $\lambda_1,\,\lambda_2$ и показателя интегральной интенсивности управляющего воздействия V.

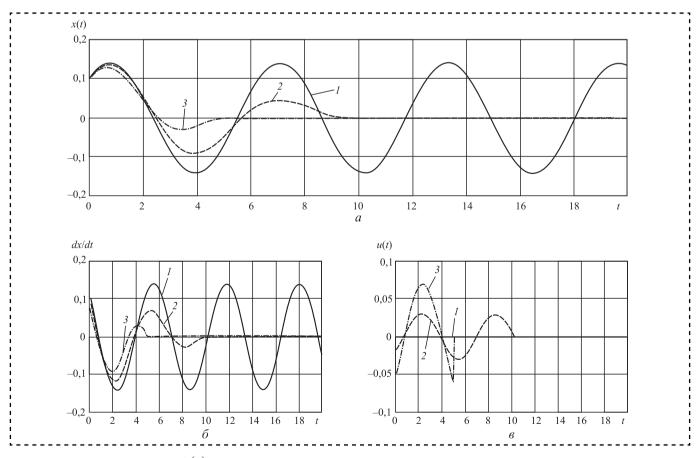


Рис. 2. Зависимости x(t) (a), $\dot{x}(t)$ (б), $u^*(t)$ (в) свободных колебаний для $\omega_0 = 1$; $\gamma = 0$: I - T = 20; 2 - T = 10; $\lambda_1 = 0.02884$; $\lambda_2 = 0.004827$; V = 0.004131; 3 - T = 5; $\lambda_1 = 0.03601$; $\lambda_2 = -0.05957$; V = 0.009833



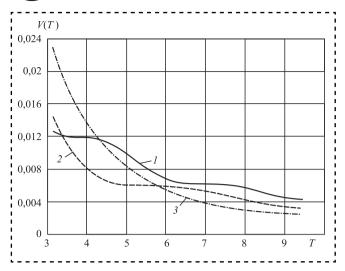


Рис. 3. Зависимость потребной интенсивности управляющего воздействия от T:

$$1 - \omega_0 = 1.0$$
; $2 - \omega_0 = 0.7$; $3 - \omega_0 = 0.4$

Параметры траекторий свободных колебаний в зависимости от времени для различных значений времени T перехода в состояние покоя показаны на рис. 2. Кривая при T=20 рассчитана без действия управляющего воздействия ($u=0,\ V=0$).

Предложенный алгоритм позволяет переводить колебания в состояние покоя в любое заданное время T и определять потребную интенсивность управляющего воздействия и, следовательно, мощность воздействия (рис. 3).

Перевод в состояние покоя за время $T=\pi$ увеличивает интенсивность воздействия в 2—3 раза по сравнению с $T=2\pi$.

Рассмотрим случай перевода в состояние покоя затухающих колебаний ($\gamma > 0$). Замена $x = X \exp(-\gamma t)$ после преобразований приводит уравнение (2) к эквивалентному виду:

$$\ddot{x} + \omega^2 x = U(t); \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2};$$

$$U(t) = u(t) \exp(\gamma t),$$
(11)

где ω — частота затухающих колебаний.

Уравнение (11) имеет близкое решение к решению уравнения (2).

Закон управляющего воздействия для затухающих колебаний отличается от закона (10) для свободных колебаницй только заменой собственной частоты колебаний ω_0 частотой затухающих колебаний ω .

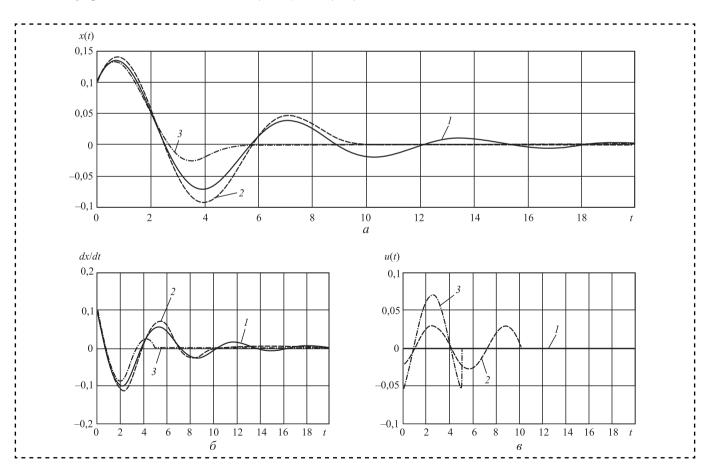


Рис. 4 Зависимости x(t) (a), $\dot{x}(t)$ (б), $u^*(t)$ (в) затухающих колебаний для $\omega_0 = 1$; $\gamma = 0,2$: 1 - T = 20; 2 - T = 10; $\lambda_1 = 0.0263$; $\lambda_2 = 0.0108$; V = 0.00376; 3 - T = 5; $\lambda_1 = 0.04157$; $\lambda_2 = -0.05622$; V = 0.00979



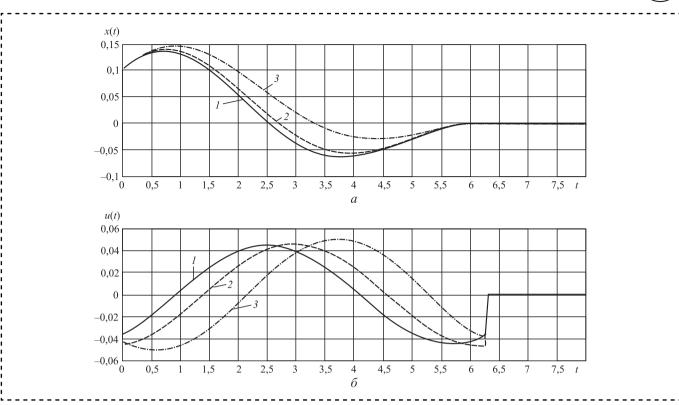


Рис. 5. Зависимости x(t) (a) и u(t) (б) затухающих колебаний при $\omega_0 = 1,0; T = 6,28$ для различных значений коэффициентов γ :

$$1 - \gamma = 0.2$$
; $2 - \gamma = 0.4$; $3 - \gamma = 0.6$

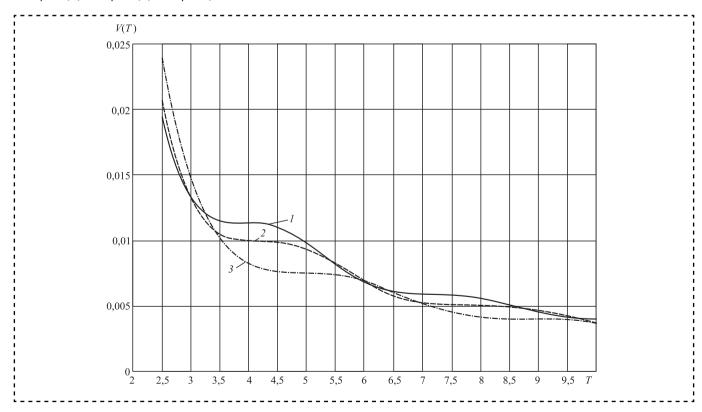


Рис. 6. Зависимости потребной интенсивности управляющего воздействия для различных значений коэффициентов затухания γ :

$$1 - \gamma = 0.2$$
; $2 - \gamma = 0.4$; $3 - \gamma = 0.6$



Расчеты перевода затухающих колебаний в состояние покоя проводили при следующих параметрах: $\omega_0 = 1.0$, x(0) = 0.1, $\dot{x}(0) = 0.1$.

На рис. 4 приведены параметры траекторий затухающих колебаний от времени для различных значений времени T перехода в состояние покоя. Кривая при T = 20 рассчитана без действия управляющего воздействия (u = 0, V = 0).

На рис. 5 показаны параметры траекторий затухающих колебаний для различных значений коэффициентов затухания у вязкого трения.

потребной Зависимости интенсивности управляющего воздействия для перевода колебаний в состояние покоя от параметров T, ω_0 представлены на рис. 6.

Выводы

1. Перевод собственных и затухающих гармонических колебаний в состояние покоя в заданное время достигается путем введения оптимального закона управляющего воздействия,

- зависящего только от времени. Структура и параметры управляющего воздействия определены на основе методов теории оптимального управления.
- 2. Уменьшение времени перехода гармонического колебания в состояние покоя требует увеличения интенсивности управляющего воздействия и, следовательно, увеличения дополнительной мощности воздействия.
- 3. Приведенные расчеты по переводу гармонических колебаний в состояние покоя подтверждают эффективность предлагаемой методики.

Библиографический список

- 1. Аграчев А.А. Оптимальное управление // Математическая составляющая. М.: Фонд "Математические этюды", 2015. 151 с.
- 2. Красовский Н.Н. Теория управления движением. Линейные системы. М.: Наука, 1968. 476 с.
- 3. Зайцев В.Ф., Полянин А.Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. М.: Физматлит, 2001. 576 с.







ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



M. H. CTERHOB. A. B. SWHWH

Степнов М.Н., Зинин А.В.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

М.: Инновационное машиностроение, 2016. 392 с.

Цена 1000 руб.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ МАТЕРИАЛОВ И ЗЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ

Монография содержит систематическое изложение существующих расчетных методов оценки характеристик сопротивления усталости традиционных конструкционных и новых композитных материалов на основе полимерной матрицы, а также методов расчета выносливости типовых элементов высоконагруженных конструкций.

Методология расчетных методов определения характеристик выносливости основана на использовании статистических данных о характеристиках механических свойств материалов при кратковременном нагружении и экспериментально обоснованных моделей учета влияния различных факторов на несущую способность конструкций при циклическом нагружении. Показано, что применение предлагаемых расчетных методов обеспечивает достаточно высокую точность оценки характеристик сопротивления усталости, не уступающую показателям точности экспериментальных исследований. Особое внимание уделено вопросам возможности оценки характеристик усталости полимерных композитных материалов в зависимости от их структурных параметров и особенностей механического поведения и механизмов усталостного разрушения.

Для инженерно-технических работников машиностроительных предприятий, конструкторских и технологических бюро. лабораторий механических испытаний, научных сотрудников, аспирантов и студентов механических специальностей.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2a, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru. Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

В ПОМОЩЬ КОНСТРУКТОРУ, ТЕХНОЛОГУ

УДК 621.01

Е.Б. Щелкунов, С.В. Виноградов, А.И. Пронин, М.Е. Щелкунова, канд-ты техн. наук (Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет) E-mail: office@knastu.ru

Применение шаблонов вычислений при проектировании механизмов параллельной структуры

Представлена оригинальная систематизация теоретически возможных компоновочных схем механизмов параллельной структуры, учитывающая характер расположения шарниров на основании и подвижной платформе. Предлагаемая систематизация позволяет создать для каждого типа компоновки механизмов параллельной структуры индивидуальные шаблоны вычислений, использующие в алгоритмах вычисления минимальный объем исходных данных.

An original systematization theoretically possible layout schemes parallel structure mechanisms, taking into account the nature of the location of the hinges on the base and moving platform was been presented. The proposed systematization allows you to create layouts for each type of parallel structure mechanisms of individual calculation templates used in the algorithm for calculating the minimum amount of initial data.

Ключевые слова: механизм параллельной структуры, приводная штанга, шарнир, металлообрабатывающий станок, компоновка.

Keywords: mechanism of parallel structure, actuating rod, hinge, metal working machine, layout.

Механизмы параллельной структуры (МПС) образуют обширный класс манипуляционных механизмов, применяемых в металлообрабатывающих станках, роботах различного назначения и других технологических машинах [1—5].

Различные сочетания конструктивных элементов МПС [6] образуют многообразие компоновочных решений (рис. 1).

В работе [7] представлен программный продукт, позволяющий частично автоматизировать процесс проектирования МПС путем применения шаблонов — индивидуальных алгоритмов вычисления параметров МПС, основанных на оригинальной классификации компоновочных решений (компоновочных схем). В качестве классификационного

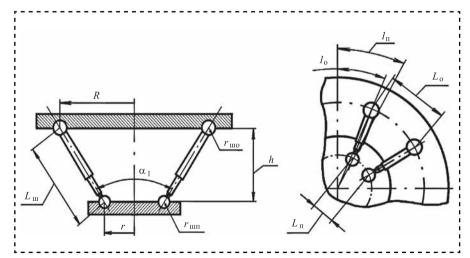


Рис. 1. Конструктивные элементы МПС со штангами переменной длины:

a— вид сбоку (сечение); δ — расположение штанг в плане; r— радиус подвижной платформы; R— радиус основания; h— расстояние между основанием и платформой; α_1 — начальный угол расхождения приводных штанг; $r_{\text{шо}}$ — радиус шарниров на основании; $r_{\text{шп}}$ — радиус шарниров на подвижной платфоме; $L_{\text{о}}$ — расстояния между шарнирами на основании; $L_{\text{п}}$ — расстояния между шарнирами на платформе; $L_{\text{ш}}$ — длина приводной штанги; $I_{\text{0}}...6_{\text{0}}$ — углы размещения шарнира на основании; $I_{\text{п}}...6_{\text{п}}$ — углы размещения шарнира на подвижной платформе



признака выбрано расположение шарниров на основании и подвижной платформе.

В результате анализа многообразия теоретически возможных компоновочных решений выделены схемы:

1) все шарниры основания и платформы размещены так, чтобы выполнялось условие зеркальной симметрии (за исключением симметрии вращения) как для подвижной платформы и основания в отдельности, так и для всей схемы в целом:

2) все шарниры основания и подвижной платформы размещены так, чтобы выполнялось условие симметрии вращения как для подвижной платформы и основания в отдельности, так и для всей схемы в целом;

3) размещение шарниров не подчиняется какому-либо порядку (асимметричные).

Схема с зеркально-симметричным размещением приводных штанг (рис. 2). Плоскости основания и подвижной платформы делятся единой плоскостью симметрии на две равные части, т.е. размещение шарниров слева от плоскости симметрии является зеркальным ото-

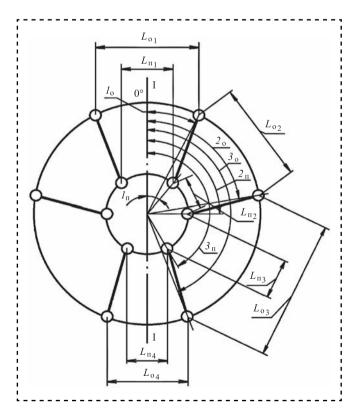


Рис. 2. МПС с зеркально-симметричным расположением шарниров:

I—I — ось симметрии; $L_{\rm ol},\,L_{\rm o2},\,L_{\rm o3}$ — расстояния между шарнирами на основании; $L_{\rm n1},\,L_{\rm n2},\,L_{\rm n3}$ — расстояния между шарнирами на подвижной платформе

бражением шарниров справа от плоскости симметрии.

Данная компоновка может быть реализована в МПС, имеющих от 2 до 6 приводных штанг. Углы размещения шарниров и расстояния между шарнирами определяют по формулам табл. 1, которые справедливы для всех схем с симметричным размещением шарниров.

Симметрия вращения является частным случаем зеркальной симметрии. Во множестве схем МПС, где выполняется условие симметрии вращения выделены следующие частные случаи (рис. 3).

1. Схема с равномерным размещением шарниров приводных штанг на основании и платформе с шагом, равным $360^{\circ}/n$, где n=2...6 — число приводных штанг. Начала отсчета углов на подвижной платформе и основании совпадают. При вращении компоновки вокруг оси симметрии на угол, кратный $360^{\circ}/n$, она проецируется сама на себя.

На рис. 3, *а* представлена схема механизма с шестью приводными штангами. Углы размещения шарниров

$$\angle 1 = 0$$
; $\angle 2 = 60^{\circ}$; $\angle 3 = 120^{\circ}$; $\angle 4 = 180^{\circ}$; $\angle 5 = 240^{\circ}$; $\angle 6 = 300^{\circ}$.

2. Схема с попарно параллельным размещением приводных штанг. Шарниры на основании и подвижной платформе размещены попарно. Пары шарниров расположены с угловым шагом, равным $360^{\circ}/2n$, где n=4, 6. Расстояния между осями шарниров в парах на платформе и основании равны. Расстояние между шарнирами в паре всегда меньше расстояния между шарнирами из разных пар. Штанги в каждой паре параллельны друг другу.

На рис. 3, δ показана схема механизма с попарно параллельным размещением шести приводных штанг. Расстояние между шарнирами в парах:

$$L = 2R\sin(\angle I_0) = 2r\sin(\angle I_{\Pi}).$$

3. Схема с "ферменным" размещением приводных штанг. Шарниры на основании и подвижной платформе расположены попарно. В отличие от попарно параллельного размещения пары шарниров на подвижной платформе и основании смещены друг относительно друга на угол 360°/2n. При этом хорда в паре всегда меньше, чем хорда между ближайшими шарнирами из разных пар. На практике "ферменное" размещение приводных штанг реализуется только в МПС с шестью



Таблица 1 Расчетные формулы для компоновки МПС с зеркально-симметричным размещением шарниров приводных штанг

Расчетный параметр	Основание	Подвижная платформа
Углы размещения шарниров	$\angle I_0 = \arcsin\left(\frac{L_0}{2R}\right);$ $\angle 2_0 = 120^\circ - \angle I_0;$	$\angle I_0 = \arcsin\left(\frac{L_0}{2r}\right);$
	$\angle 3_0 = 120^\circ - \angle I_0,$ $\angle 3_0 = 120^\circ + \angle I_0;$	$\angle 2_{\Pi} = 120^{\circ} - \angle I_{\Pi};$ $\angle 3_{\Pi} = 120^{\circ} + \angle I_{\Pi};$
	$\angle 4_0 = 240^\circ - \angle 1_0;$	$\angle 4_{\Pi} = 240^{\circ} - \angle I_{\Pi};$
	$\angle 5_{0} = 240^{\circ} + \angle I_{0};$	$\angle S_{\Pi} = 240^{\circ} + \angle I_{\Pi};$
	$\angle 6_{\rm o} = 360^{\circ} - \angle I_{\rm o}$	$\angle 6_{\Pi} = 360^{\circ} - \angle I_{\Pi}$
Расстояния между шарнирами	$L_{o_1} = 2R\sin(\angle I_{o});$	$L_{\Pi_1} = 2r\sin\left(\angle I_{\Pi}\right);$
	$L_{o_2} = 2R\sin\frac{\angle 2_0 - \angle I_0}{2};$	$L_{\Pi_2} = 2r\sin\frac{\angle 2_{\Pi} - \angle I_{\Pi}}{2};$
	$L_{o_3} = 2R\sin\frac{\angle 3_0 - \angle 2_0}{2};$	$L_{\Pi_3} = 2r\sin\frac{\angle 3_{\Pi} - \angle 2_{\Pi}}{2};$
	$L_{o_4} = 2R\sin\frac{\angle 4 \text{ o} - \angle 3_0}{2};$	$L_{\Pi_4} = 2r\sin\frac{\angle 4_{\Pi} - \angle 3_{\Pi}}{2};$
	$L_{o_5} = L_{o_3};$ $L_{o_6} = L_{o_2}$	$L_{\pi_5} = L_{\pi_3};$ $L_{\pi_6} = L_{\pi_2}$

приводными штангами с угловым шагом размещения шарниров 60° (рис. 3, θ).

Расстояния между шарнирами в парах на основании и подвижной платформе:

$$L_{\rm o} = 2R\sin(\angle I_{\rm o});$$

$$L_{\Pi} = \frac{r \sin\left(60^{\circ} - \angle I_{\Pi}\right)}{2}.$$

Конструктивные параметры других симметричных компоновок показаны на примере схемы с шестью приводными штангами (рис. 4).

Расстояния между шарнирами в парах на основании и подвижной платформе:

$$L_{\rm o} = 2R\sin(\angle I_{\rm o});$$

$$L_{\Pi} = 2r\sin\left(\angle I_{\Pi}\right).$$

Асимметричное размещение приводных штанг может быть реализовано в бесконечном множестве вариантов расположения шарниров приводных штанг как на основании, так и на подвижной платформе (рис. 5).

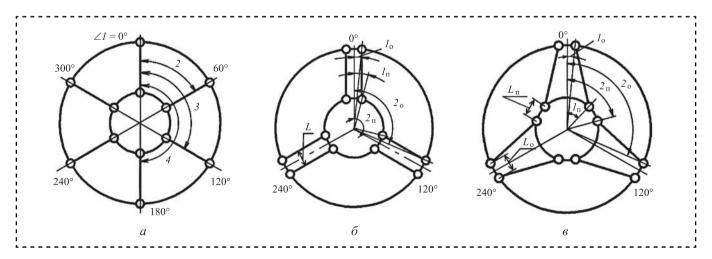


Рис. 3. МПС:

a — с равномерным размещением шарниров приводных штанг: 1, 2, 3, 4 — углы размещения шарниров приводных штанг относительно начала отсчета; δ — с попарно-параллельным размещением приводных штанг: L — расстояние между шарнирами в паре; ϵ — с "ферменным" размещением приводных штанг

Таблица 2

Расчетные формулы для компоновки МПС с асимметричным размещением шести приводных штанг

Основание	Подвижная платформа
$L_{o_1} = 2R \sin\left(\frac{\angle I_0 + (360^\circ - \angle G_0)}{2}\right);$	$L_{\Pi_1} = 2r \sin\left(\frac{\angle I_{\Pi} + (360^\circ - \angle \theta_{\Pi})}{2}\right);$
$L_{o_2} = 2R\sin\frac{\angle 2_{o} - \angle I_{o}}{2};$	$L_{\Pi_2} = 2r\sin\frac{\angle 2_{\Pi} - \angle I_{\Pi}}{2};$
$L_{o_3} = 2R\sin\frac{\angle 3_0 - \angle 2_0}{2};$	$L\pi_3 = 2r\sin\frac{\angle 3_{\Pi} - \angle 2_{\Pi}}{2};$
$L_{o_4} = 2R\sin\frac{\angle 4_0 - \angle 3_0}{2};$	$L_{\Pi_4} = 2r\sin\frac{\angle 4_{\Pi} - \angle 3_{\Pi}}{2};$
$L_{0_5} = 2R\sin\frac{\angle 5_0 - \angle 4_0}{2};$	$L_{\Pi_5} = 2r\sin\frac{\angle S_{\Pi} - \angle A_{\Pi}}{2};$
$L_{o_6} = 2R\sin\frac{\angle 6_{o} - \angle 5_{o}}{2}$	$L_{\Pi_6} = 2r\sin\frac{\angle \delta_{\Pi} - \angle S_{\Pi}}{2}$

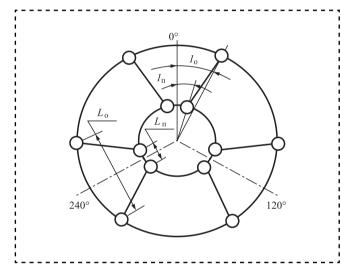


Рис. 4. Конструктивные параметры симметричной компоновки МПС

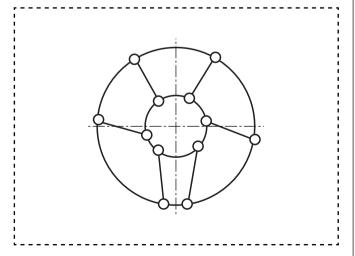


Рис. 5. Схема компоновки МПС с асимметричным размещением приводных штанг

В МПС с асимметричным расположением приводных штанг углы размещения каждого шарнира задаются индивидуально. Расстояния между шарнирами определяют по формулам, табл. 2.

Представленная систематизация позволяет создать для каждого типа компоновки МПС индивидуальные шаблоны вычислений, основанные на задании минимального объема исходных данных и соответствующих алгоритмах вычисления остальных геометрических параметров проектируемого МПС [6]. Например, для компоновки с попарно параллельным размещением приводных штанг исходные данные могут быть заданы одним из вариантов сочетания параметров МПС:

- 1) R, r, r_{IIII} , r_{IIIO} , α_1 , I_{Π} , I_{O} , L_{Π} ;
- 2) R, r, r_{IIII} , r_{IIIO} , α_1 , l_{II} , l_{O} , l_{O} ;
- 3) R, r, $r_{\text{III}\Pi}$, r_{IIIO} , α_1 , l_0 , l_0 , l_{Π} ;
- 4) R, r, r_{IIII} , r_{IIIO} , α_1 , l_{Π} , l_{O} , l_{Π} ;
- 5) R, r, r_{IIII} , r_{IIIO} , h, L_{III} , l_{II} , l_{O} , L_{II} ;
- 6) R, r, $r_{\text{шп}}$, $r_{\text{шo}}$, h, $L_{\text{ш}}$, $1_{\text{п}}$, 1_{o} , L_{o} ;
- 7) R, r, $r_{\text{ШП}}$, $r_{\text{ШO}}$, h, $L_{\text{Ш}}$, l_{O} , L_{O} , L_{T} ;
- 8) R, r, r_{III} , r_{III} , h, L_{II} , l_{II} , L_{O} , L_{II} .

Остальные параметры вычисляют по формулам, представленным в описании компоновки с попарно параллельным размещением приводных штанг. Подобным образом рассчитывают параметры МПС для любого из приведенных в классификации типов компоновок.



Заключение

Систематизированы теоретически возможные компоновочные схемы механизмов параллельной структуры, учитывающие характер расположения шарниров на основании и подвижной платформе. Разделение компоновочных схем позволяет создать для каждого типа компоновки МПС индивидуальные шаблоны вычислений и формализовать процесс проектирования. Указанные шаблоны основаны на особенностях задания исходных данных и заложенных алгоритмах вычисления геометрических параметров проектируемого МПС.

Библиографический список

- 1. **Глазунов В.А., Колискор А.Ш., Крайнев А.Ф.** Пространственные механизмы параллельной структуры. М.: Наука, 1991. 195 с.
- 2. **Merlet J.P.** Parallel Robots. Berlin: Springer, 2006. 394 p.

- 3. **Компоновки** станков с механизмами параллельной структуры / под ред. Ю.Н. Кузнецова и др. Херсон: ПП Вишемирський В.С., 2010. 471 с.
- 4. **Смирнов В.А.** Реализация компьютерного управления на постоянной несущей частоте применительно к оборудованию с параллельной кинематикой // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 2. С. 39—46.
- 5. Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Щелкунова М.Е., Самар Е.В. Механизмы параллельной структуры в металлорежущих станках // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. 2012. № IV-1. С. 52—61.
- 6. Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Щелкунова М.Е., Посаженников Д.Г. Автоматизация проектирования механизмов параллельной структуры со штангами переменной длины // Технология машиностроения. 2015. № 11. С. 51—55.
- 7. **Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Щелкунова М.Е., Пронин А.И.** Программа для проектирования механизмов параллельной структуры // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. 2015. № IV-1 (24) С. 46—49.

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 08.07.2017. Подписано в печать 28.08.2017. Формат $60 \times 88 \ 1/8$.

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

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru** Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.



20-я Международная выставка оборудования для обработки листового металла, труб и производства металлоизделий



24-26 октября 2017 года Москва, МВЦ «Крокус Экспо»











- Оборудование для обработки листового металла и труб
- Оборудование для резки и штамповки листового металла
- Линии и оборудование для профилирования листового металла
- Металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование и инструмент
- Оборудование для промышленной окраски и лакокрасочные материалы

Забронируйте стенд на сайте www.mashex.ru

Более 13 000 посетителей -

представители предприятий машиностроительной, металлургической, авиационно-космической, строительной, нефтегазовой отрасли, энергетики и других отраслей.



Одновременно с Mashex Moscow:









