

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

9 2019

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, Алешин Н.П., д-р техн. наук, акад. РАН, Братухин А.Г., д-р техн. наук, Воронцов А.Л., д-р техн. наук, Гусейнов А.Г., д-р техн. наук, Дмитриев А.М., д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), Драгунов Ю.Г., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Древаль А.Е., д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), Кутин А.А., д-р техн. наук, Омельченко И.Н., д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), Кузин В.В., д-р техн. наук, Попов Д.Н., д-р техн. наук, Попов А.В., д-р техн. наук, Рыбин В.В., д-р техн. наук, член-корр. РАН, Трегубов Г.П., д-р техн. наук, Сычев А.П., канд. физ.-мат. наук, Скугаревская Н.В. (ответственный секретарь)

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

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

Телефон: 8-(499) 269-51-98

Адрес редакции:

107076, Москва,

Колодезный пер., д. 2a, стр. 2 Телефон: 8-(495) 661-38-80.

E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru

www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за ПИ N 77-12421 в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуни-каций

Учредитель: А.И. Савкин

Индекс: **27841** ("Пресса России")

Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.

Сайт: www.aov.ru

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENTS

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН	DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES
Карелин И. Н., Чернова Т. А. — Проектирование газонефтяной арматуры повышенной долговечности	Karelin I. N., Chernova T. A. — Design of gas and oil fittings of increased durability
Дьяков И. Ф., Моисеев Ю. В. — Основы подрессоривания транспортных средств	D'yakov I. F., Moiseev Yu. V. — The basics of suspension of transport vehicles
Шишкин С. В. — Конструкция и расчет термомеханического съемника	6 Shishkin S. V. — Structure and calculation of a thermomechanical puller
Устарханов О. М., Батдалов М. М., Муселемов Х. М., Устарханов Т. О. — Экспериментальные исследования трехслойных труб	Ustarkhanov O. M., Batdalov M. M., Muselemov Kh. M., O Ustarkhanov T. O. — Experimental studies of three-layer pipes
Стебулянин М. М., Маляренко А. В. — Метод стабилизации скорости интервальных мехатронных систем	Stebulyanin M. M., Malyarenko A. V. — Method of stabilizing the velocity of interval mechatronic systems
Слепцов В. В., Савилкин С. Б., Осипов В. В., Мацыкин С. В. — Частотный преобразователь для трехфазных асинхронных электродвигателей с питанием от низковольтного источника постоянного напряжения	Sleptsov V. V., Savilkin S. B., Osipov V. V., Matsykin S. V. — Frequency converter for three-phase asynchronous electric motors powered by a low-voltage direct current source
Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки	Problems oftribology — friction, wearing away and lubrication
Албагачиев А. Ю., Буяновский И. А., Самусенко В. Д., Чурсин А. А. — Температурная стойкость космических смазок российского производства 3	Albagachiev A. Yu., Buyanovskiy I. A., Samusenko V. D., Chursin A. A. — Temperature resistance of space lubricants, produced in Russia
ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ	MANUFACTURING ENGINEERING
Холопов В. А., Антонов С. В., Курнасов Е. В., Каширская Е. Н. — Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса	Kholopov V. A., Antonov S. V., Kurnasov E. V., Kashirskaya E. N. — Development and use of a digital twin of a mechanical engineering technological process
Коростелкин А. А., Клявин О. И., Алешин М. В., Годун Ван, Суйфэн Ван, Дзини Лю — Оптимизация массы кузова в контексте краш-теста автомобиля класса внедорожник.	Korostelkin A. A., Klyavin O. I., Aleshin M. V., Godun Wang, Suifeng Wang, Jini Liu — Body mass optimization in the context of a crash test of ar off-road class car
Пристинский Ю. О., Перетягин Н. Ю., Кузнецова Е. В., Перетягин П. Ю. — Сравнение механических свойств твердых сплавов ВК6, полученных традиционным методом и искровым плазменным спеканием	Pristinskiy Yu. O., Peretyagin N. Yu., Kuznetsova E. V., Peretyagin P. Yu. — Comparison of the mechanical properties of "BK6" hard alloys obtained by the traditional method and by spark plasma sintering
Шарин П. П., Акимова М. П., Яковлева С. П., Большаков А. М., Попов В. И. — Структура и прочность переходной зоны при твердофазном термически активируемом контактном взаимодействии алмаза с железом и титаном	Sharin P. P., Akimova M. P., Yakovleva S. P., Bol'shakov A. M., Popov V. I. — The structure and strength of the transition zone in the case of solid-phase thermally activated contact interaction of a diamond with iron and titanium
Алехина В. К., Бикбаев Р. М., Глущенков В. А., Гречников Ф. В. — Использование материалов с памятью формы в технических устройствах	Alekhina V. K., Bikbaev R. M., Glushchenkov V. A., Grechnikov F. V. — The use of materials with shape memory in technical devices
Суслов А. Г., Федонин О. Н., Медведев Д. М. — Проектирование функционально ориентированных технологических процессов	Suslov A. G., Fedonin O. N., Medvedev D. M. — Designing of functionally oriented technological processes
Проблемы теории и практики резания материалов	Problems of theory and practice of materials cutting
Анцев А. В., Пасько Н. И. — Учет разброса периода стойкости при оптимизации режимов резания и профилактической замены инструмента	Antsev A. V., Pas'ko N. I. — Account of allowance for variation in the durability period in optimization of cutting modes and preventive tool replacement
Кудряшов Е. А., Смирнов И. М., Гришин Д. В. — Обоснование выбора рациональной формы сменной многогранной пластины токарного резца 7	Kudryashov E. A., Smirnov I. M., Grishin D. V. — Justification for the choice of the rational form of a replaceable multi-faceted turning tool plate
ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ	PROBLEMS OFECOLOGY AND SAFETY
Васильев Ю. С., Лиханов В. А., Лопатин О. П. — Улучшение экологических показателей мобильных теплоэнергетических установок при работе на альтернативных топливах	Vasil'ev Yu. S., Likhanov V. A., Lopatin O. P. — Improving the environmental performance of mobile thermal power plants when working on alternative fuels
ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА	ECONOMICS AND ORGANIZATION OF PRODUCTION
Долгов В. А., Кабанов А. А., Леонов А. А., Луцюк С. В. — Имитационное	Dolgov V. A., Kabanov A. A., Leonov A. A., Lutsyuk S. V. — Simulation modeling of equipment maintenance and renair processes

Технический редактор *Т. А. Шацкая* Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 28.06.2019. Подписано в печать 18.08.2019. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 621.646.986

И. Н. КАРЕЛИН, д-р техн. наук, Т. А. ЧЕРНОВА, канд. техн. наук (РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина), e-mail: karelin-in@mail.ru

Проектирование газонефтяной арматуры повышенной долговечности

С позиций системного подхода рассмотрена проблема низкой долговечности газонефтяной арматуры при работе с потоками сред с механическими примесями. Показана конструктивная реализация принципа разделения функций элементов системы. Эффективность решений подтверждена патентами на изобретения.

Ключевые слова: трубопроводная арматура, долговечность, абразивная эрозия, системный подход, разделение функций элементов системы, шиберная задвижка.

From the position of a system approach, the problem of low durability of gas and oil fittings when working with fluids with mechanical impurities is considered. The structural implementation of the principle of separation of functions of the system elements is shown. The effectiveness of solutions is confirmed by patents for inventions.

Keywords: pipeline fittings, durability, abrasive erosion, system approach, separation of functions of the system elements, gate valve.

Актуальность проблемы повышения экологической и промышленной безопасности газонефтяного производства лежит в основе приоритетного развития отрасли, непосредственно связанного с надежностью технологического оборудования. Специфика газонефтяной отрасли во многом обусловлена масштабными трубопроводными системами и проектами. Практически любое газонефтяное оборудование какой бы то ни было сложности оснащено трубопроводными обвязками, в которых задействована многочисленная общеизвестная арматура (задвижки, краны, клапаны и пр.). В частности, касаясь масштабных проектов, отметим необходимость все большего количества специфических трубопроводных устройств для критических условий эксплуатации [1]. Простейшим решением данной задачи представляется адаптация существующих конструкций арматуры.

Высокие или низкие температуры транспортируемых сред, их повышенное давление и многофазный состав, сложная геометрия трубопроводных обвязок оборудования являются объективными и часто неустранимыми негативными факторами. Так, в отрасли используется такое оборудование, технологический режим эксплуатации которого предусматривает неизбежный контакт с потоками сред, включающих механические примеси в сверхнормативных концентрациях. И прежде всего это трубопроводные обвязки следующих технологических систем:

бурения газовых и нефтяных скважин;

фонтанного, насосного и других способов добычи;

комплексной подготовки нефти или газа;

магистральных газонефтепроводов;

подземных хранилищ природного газа и др.

Причем фактор критичности при анализе целесообразности адаптации во всех конструкциях, например, запорной и регулирующей арматуры оказался изначально заложенным в принципе их действия. В процессе работы указанных устройств, сопровождающейся кратковременным (циклическим) или более длительным защемлением загрязненного управляемого потока, скорость последнего, а следовательно, и агрессивность резко возрастают. Отказы вследствие интенсивного разрушения различных, в том числе и защитных, материалов деталей арматуры (рис. 1) ведут к далеко идущим последствиям: от нарушения нормального режима функционирования более значимого и дорогостоящего оборудования до невосполнимого экологического ущерба и разной степени травматизма персонала, порой несовместимого с жизнью.

В борьбе с указанной критичностью даже богатейший опыт материалозамещения, т. е. защита изнашивающихся деталей более стойкими (даже самыми твердыми из существующих) материалами, а также применение упрочняющих технологий [2] для защиты деталей арматуры сколько-нибудь заметного эффекта не принесли [3]. Существующее направление решения проблемы долговечности состояло в эмпирическом

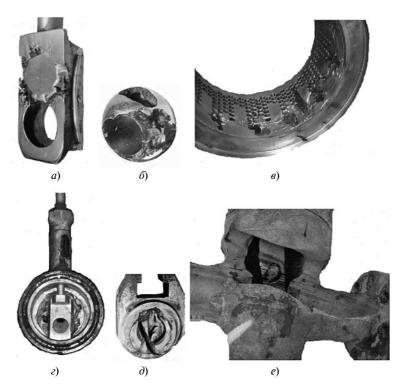


Рис. 1. Виды повреждений деталей газонефтяных трубопроводных устройств с защитой спецматериалами:

a — шибер фонтанной задвижки с супернаплавкой (Япония); δ — шаровая пробка с покрытием твердым хромом клапана системы очистки природного газа (СССР); ϵ — клетка уникального регулирующего клапана (Голландия); ϵ — регулирующее устройство с твердосплавными деталями проточной части (Россия); δ — клинкет задвижки с коррозионно-стойкой наплавкой (Румыния); ϵ — корпус фонтанной задвижки из высоко-качественной стали (Россия)

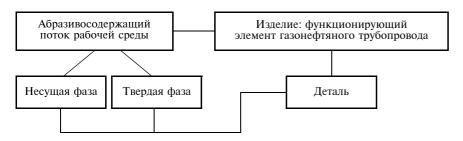


Рис. 2. Структурная схема системы абразивной эрозии элемента газонефтяного трубопровода

подходе, т. е. в непосредственности реализуемого принципа "где изнашивается, там и надо упрочнять". Такое положение дел свидетельствовало о необходимости методологического пересмотра решения означенной проблемы, причем в триботехническом аспекте [4]. Изучение методологических средств показало, что прерогативой методологии системного подхода как раз и является постановка новых задач исследований [5].

Использование системного подхода при решении рассматриваемой проблемы в настоящей работе инициировала рациональная мысль зарубежных специалистов в области трибологии об исследовании газодинамической ситуации в окрестности изнашиваемой поверхности [6]. Причем было понятно, что под окрестностью целесообразно понимать гидравлическую характеристику всей проточной части изнашиваемого изделия. Анализ сущест-

вующих технических решений конструкций элементов трубопроводов (применение сопел, лопаток, клеток и решеток, создание конструктивных элементов, повышающих плавность изменения расходной характеристики запорных устройств и т. п.) косвенно подтвердил целесообразность данного направления исследований.

Изучение известных в теории эрозии трибосистем вида "поток — материал преграды" [7] позволил предложить новое системное представление объекта исследования, т. е. физическую интерпретацию понятия системы, при формировании которой первичным является признак целостности [8]. Первичность целостности в данном случае понимается в том аспекте, что только целое дает смысл каждому элементу ("...только целое дает смысл каждому камню" [9]). Признак же целостности обусловлен наличием интегративного свойства, которое присуще системе в целом, но не может быть отнесено ни к одному из ее элементов в отдельности. Таковым как раз и является износ.

Тогда, исходя из условия целостности и поскольку отказ, например, запорного устройства вследствие абразивной эрозии происходит в изделии, новая более полная система включает в себя изделие в процессе функционирования (т. е. в процессе изменения геометрических характеристик проточной части изделия или составляющих ее деталей) и абразивосодержащий поток рабочей среды (рис. 2). Каждый из этих элементов рассматривается с позиций развития интегративного свойства трибосистемы — износа, причем не в статике. В этом суть механизма обеспечения целостности системы как методологической специфики системного подхода. Новая система полностью отвечает всем необходимым требованиям: целостности и членимости, наличия связей, структуры и интегративного свойства.

Для изучения процесса функционирования данной системы использован логический эксперимент на геометрической модели, изоморфной объекту с точки зрения изучаемых при эксперименте свойств, например, на шиберном затворе запорного устройства. После определения свойств элементов "поток" и "изделие", которые при реализации связи между элементами трансформируются в функции, задача и логика такого эксперимента состоит в построении альтернативных причинно-следственных цепочек от возникновения до имеюшегося внешнего вила отказавших по причине абразивной эрозии деталей затворов. В данном случае при восстановлении логической цепи событий, приводящих к функциональному отказу изделия, внешний вид повреждений отказавших деталей является исходной информацией (рис. 3).

В ходе логического эксперимента изучают изменения свойств основных элементов системы на уровне связи "изделие — поток". Элемент "изделие" характеризуется свойством "конструкция". Такие свойства, как массогабаритные параметры, присоединительные размеры, тип управления и др., используются как ограничения на этапе реализации технических решений, полученных в результате данного эксперимента.

На этом же уровне системы из свойств элемента "абразивосодержащий поток рабочей среды" рассматривается скорость этого потока. Другие свойства потока (например, фазовый состав потока, концентрация и свойства абразивных частиц, химический состав вещества несущей фазы потока, давление, температура и др.) имеют значение на других уровнях связи элементов системы.

При реализации связей в системе рассматриваемые свойства определяют соответствующие функции элементов. Именно анализ функций элементов



Рис. 3. Внешний вид поверхностных разрушений отказавшей детали запорного устройства

системы, предусмотренный методологией системного подхода, в данном случае оказывается наиболее конструктивным. Функция элемента "изделие" представляет собой принцип действия, который в запорных устройствах определяется как процесс перекрытия потока рабочей среды с заданной степенью герметичности. Степень же герметичности определяется соответствующим классом по ГОСТ Р 54808-2011 (или АРІ 598), регламентирующим протечку среды через закрытый затвор. Выполнение запорным устройством своей функции определяется двумя фиксированными положениями запорного органа: "открыто" и "закрыто". При этом промежуточное фиксированное положение запорного органа при управлении устройством запрещается стандартными техническими требованиями на излелие.

Функция элемента "поток", следующая из свойства "скорость", состоит в агрессивном воздействии на изделие, причем только в смысле эрозионного воздействия абразивосодержащего потока рабочей среды, поскольку скорость потока частиц является, как известно, определяющим фактором скорости абразивной эрозии.

Внешний вид эрозионных повреждений на запорных поверхностях деталей шиберного затвора (см. рис. 3), приводящих к функциональному отказу задвижки, свидетельствует о функционировании абразивосодержащего потока в положении затвора "закрыто". Эрозионные разрушения распространяются под контактными герметизирующими поверхностями затворов "шиберседло" и далее именно в положении затвора "закрыто". Логика причинно-следственной цепи такова: большие эрозионные повреждения -> высокая скорость абразивной эрозии → высокая скорость потока → негерметичное перекрытие потока. Таким образом, негерметичное перекрытие потока обусловлено конструкцией изделия, а значит, рассматриваемыми функциями элементов системы. Дальнейшая логическая цепь событий представляется альтернативной.

Вариант 1. Если не рассматривать случай нарушения технологической дисциплины при управлении запорным устройством, популярнее — "человеческий фактор" (т. е. эксплуатацию при полуоткрытом положении затвора), то возможной причиной отказа затвора может быть отсутствие фиксаторов конечных положений затвора или рассогласование положений механизма привода с относительным положением деталей затвора. В этом случае выступающая в проходном отверстии в положении затвора "открыто" часть шибера разрушается в результате абразивной эрозии рабочим потоком, т. е. разрушаются участок герметизирующей поверхности шибера с входной стороны устройства и участок герметизирующей поверхности седла с выходной стороны (рис. 4), и в положении затвора "закрыто" по этим участкам происходит протечка рабочей среды, т. е. наблюдается негерметичность затвора.

Вариант 2. По причинам, указанным в варианте 1, в положении затвора "закрыто" герметизирующие поверхности седел не симметричны герметизирующим поверхностям шибера (рис. 5). Как известно, шиберный затвор

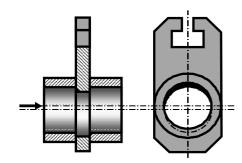


Рис. 4. Схема разрушения герметизирующих поверхностей деталей при полуоткрытом положении затвора

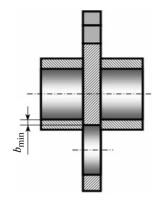


Рис. 5. Схема нарушения герметичности затвора вследствие недостаточной контактной ширины деталей

обеспечивает герметичность в положении "закрыто" преимущественно за счет самоуплотнения (герметизирующее усилие или контактное давление обеспечивается перепадом давления рабочей среды на затворе). Несимметричность положения деталей затвора влечет за собой образование в положении "закрыто" герметизирующего участка, имеющего ширину b_{\min} , меньшую контактной ширины b, необходимой для герметизации. Такое явление также приводит к возникновению негерметичности затвора.

Реализация варианта 1 или варианта 2 образования негерметичности зависит от режима эксплуатации запорного устройства — "нормально открыто" или "нормально закрыто".

Вариант 3. Принцип действия данного запорного устройства при перекрытии рабочего потока предусматривает постепенное перекрытие проходного отверстия в процессе поступатель-

ного перемещения подвижной детали запорного органа. Как раз эта функция, которую можно назвать блокированием потока, т. е. снижением расхода протекающего загрязненного потока до достижимого минимума, и является принципиальной с позиций возникновения и развития отказа. Ранее такая функция в известных трибосистемах, описывающих запорные трубопроводные устройства, не выявлялась. Герметизирующие поверхности шибера (с входной стороны) при реализации функции блокирования потока подвергаются кратковременному (т. е. в течение периода срабатывания затвора) воздействию рабочего потока. За несколько циклов срабатывания изделия повреждения этих участков герметизирующих поверхностей достигают таких значений, при которых герметичность перекрытия нарушается (рис. 6).

Рассмотренные варианты 1, 2, 3 являются достоверными причинами отмеченной негерметичности перекрытия рабочего потока. Поскольку проходное сечение негерметичного затвора в положении "закрыто", по которому происходит протечка среды, существенно мало по сравнению с сечением условного прохода, имеет место высокая скорость перетекания рабочей среды через затвор с входа на выход при существующем в трубопроводе перепаде давления рабочей среды.

Поэтому наблюдаемые эрозионные разрушения (см. рис. 1, *а* и рис. 3) достигают величин, вызывающих функциональный отказ изделия, именно в положении затвора "закрыто".

В вариантах 1 и 2 причина возникновения негерметичности затвора легко устранима. В варианте 3 необходимо целенаправленно воздействовать на свойства элементов системы конструктивными и другими методами (например, удалением примесей из потока, что в рассматриваемых трубопроводах неосуществимо).

Декомпозиция рассматриваемой системы и анализ функций ее элементов позволяют определить конструктивный фактор воздействия на параметры изнашиваемого потоком изделия: в конструкции должно быть предусмотрено, чтобы повреждаемые участки герметизирующих поверхностей деталей затвора не участвовали в его герметичном перекрытии. Экстраполяция данного положения на другие типы арматуры для загрязненных сред позволяет сформулировать более обобщенный принцип разделения функций: в конструкции изделия детали или их поверхности, выполняющие основную или непосредственно связанную с ней функцию, не должны выполнять функцию защиты от абразивной эрозии, которая должна быть возложена на другие поверхности или детали.

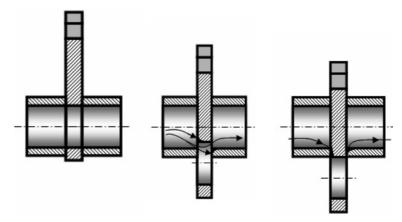


Рис. 6. Схема образования негерметичности шиберного затвора в течение циклов срабатывания

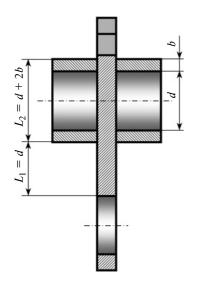


Рис. 7. Схема реализации полного разделения рабочих поверхностей шибера



Рис. 8. Шибер модернизированной фонтанной задвижки

На основе данного принципа первые запатентованные технические решения модернизированного запорного узла фонтанной шиберной задвижки были предложены в виде разделения функций рабочих поверхностей шибера [10] и в виде дополнительных деталей запорного узла в совокупности с разделением функций поверхностей [11].

При реализации полного разделения рабочих поверхностей шибера (рис. 7) на блокирующую (защитную) и герметизирующую (функциональную) требовалось изготовление новой корпусной детали задвижки, что в условиях ремонтной базы одного из подземных хранилищ природного га-

за было неосуществимо. Фактически удалось лишь изменить диаметр проходного отверстия шибера и седел с 65 до 50 мм. При этом в пределах базовой корпусной детали рабочая часть шибера несколько увеличилась и блокирующие поверхности были отделены от герметизирующих известными из триботехники поперечными абразивоудаляющими канавками.

Опытный образец задвижки испытан на скважине и получен интересный результат. По отзывам операторов, работающих с этой задвижкой, звук при ее работе отличался от звука при работе обычной задвижки, а также отмечалось меньшее усилие на ручном приводе. Обследование разобранной задвижки показало локализацию эрозионного воздействия управляемого потока на блокирующих поверхностях и канавках (рис. 8). Отсюда были сделаны два полезных вывода:

канавки не только счищают и удаляют абразивные загрязнения с контактных поверхностей, но и выполняют разгрузочную функцию при защемлении потока, т. е. изменяют газодинамическую ситуацию в окрестности изнашиваемых поверхностей;

размер блокирующей поверхности в направлении рабочего

хода шибера может быть меньше требуемого размера двойного хода.

В результате после расчетов прочности, размерных цепей изделия и размеров разгрузочно-абразивоудаляющих канавок конструктивная схема модернизированного запорного узла (рис. 9) полностью вписалась в исходные габариты и прочие размеры задвижки. Эксплуатационные испытания опытных образцов модернизированных фонтанных задвижек, изготовленных на российских заводах (Алексинский завод "Тяжпромарматура"; "Рыбинское конструкторское бюро моторостроения"; "Волжский машиностроительный завод"; "Воткинский завод"; "Воронежский механический завод"; "Калужский турбинный завод"), явились основанием рекомендации ОАО "Газпром" к использованию данного технического решения в продукции, поставляемой заводами на производственные объекты отрасли.

Даже в рассмотренном простейшем варианте реализации принципа разделения функций на шибере конструкция задвижки оказалась конкурентоспособнее предлагаемой в России американской задвижки с двойным седлом фирмы Foster [12].

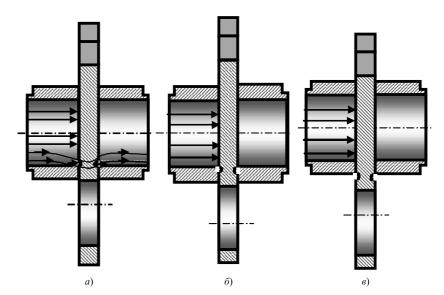


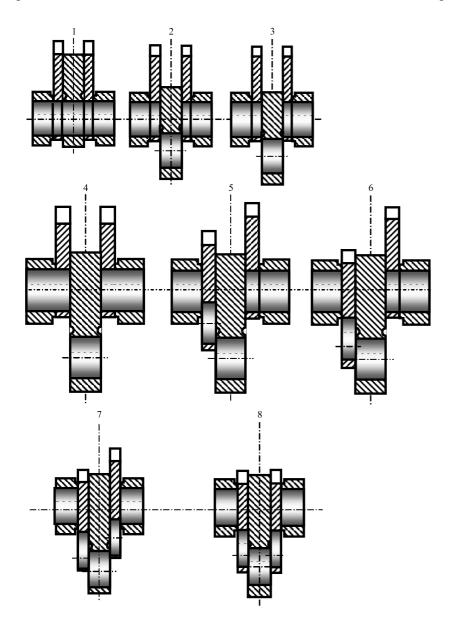
Рис. 9. Схема модернизированного шиберного затвора с разгрузочно-абразивоудаляющими канавками на этапах блокирования (a), завершения блокирования (δ), завершения герметизации (δ)

Последующая модернизация задвижки в виде вышеупомянутого запатентованного технического решения [11] вследствие несколько более сложной реализации касалась не только шибера, но и неподвижных седел изделия. До опытного образца модернизированного изделия данное техническое решение автором доведено не было.

Суть изобретения сводилась к защите седел с применением дополнительных деталей, ведь контактные кольцевые поверхности седел участвуют как в процессе блокирования потока, где в секторе защемления потока активно

повреждаются, так и в герметизации затвора (см. рис. 6). Поэтому согласно принципу разделения функций контактные поверхности поврежденных седел также не должны участвовать в выполнении функции герметизации, т. е. их следует удалить из зоны герметизации затвора. Для этого шиберный затвор предложено оснастить двумя дополнительными защитными шиберами, расположенными между неподвижными седлами и основным шибером и выполняющими функцию подвижных седел.

Порядок перемещения дополнительных деталей такого запор-



Puc. 10. Схема модернизированного шиберного затвора с дополнительными защитными шиберами

ного узла сводится к следующему (рис. 10). На закрытие затвора основной шибер с разгрузочноабразивоудаляющими канавками при защищенных защитными шиберами седлах совершает рабочий ход до положения "закрыто" (положения 1—4). Затем при перекрытом проходном отверстии поочередно в направлении рабочего хода основного шибера перемещаются защитные шиберы на расстояние, равное диаметру проходного отверстия плюс ширина контактного кольца неподвижного седла (положения 5—8). На открытие затвора указанные детали запорного узла совершают перемещения в обратном порядке, т. е. сначала поочередно перемещаются защитные шиберы при перекрытом проходном отверстии, а затем основной шибер осуществляет открытие проходного отверстия.

В результате поврежденные в процессе блокирования потока поверхности защитных шиберов, закрывающих неподвижные седла, удаляются из зоны герметизации и в контакт с неповрежденными потоком поверхностями основного шибера и седел вступают не поврежденные потоком поверхности дополнительных шиберов. Таким образом осуществляется полная защита запорного узла шиберной задвижки от абразивной эрозии, поскольку движущийся поток абразивосодержащей рабочей среды в процессе перемещения основного и защитных шиберов не воздействует на герметизирующие поверхности седел. В процессе перемещения основного шибера движущийся поток воздействует на контактные поверхности защитных шиберов, а не на герметизирующие поверхности седел. При перемещении защитных шиберов поток остановлен и, следовательно, не агрессивен.

Конструкторская доработка данного технического решения требует выполнения интересной задачи проектирования механизма согласования движений шибе-

ров в рассмотренной последовательности, и соответственно, проектирования нового корпуса задвижки, выполнения прочностных, точностных и прочих необходимых расчетов. В таком исполнении может быть получена реально долговечная износостойкая фонтанная шиберная задвижка.

Предложенное конструктивное разделение функциональных и защитных поверхностей и деталей затвора задвижки своей простотой и эффективностью реализации выгодно отличается от существующей реализации только технологических методов защитного поверхностного упрочнения или применения новых перспективных защитных материалов (например, технической керамики или композитов) и вместе с тем существенно повышает их эффективность (этот вопрос проработан, но выходит за рамки настоящей статьи).

Методологически разработанный принцип разделения функ-

ций в плане реализации представляется достаточно универсальным, поскольку явился основой изобретения целого ряда технических решений долговечной газонефтяной трубопроводной арматуры, даже с доказанной на практике эффективностью так и не получивших применения, которые могут оказаться полезными и в других отраслях промышленности (например в металлургии, горнодобывающей, химической и т. д.).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Материалы** Международного форума "Valve Industry Forum & Ехро. Оборудование для критических условий эксплуатации". Москва, ЦВК "Экспоцентр", 1—3 ноября 2016 г.: www. valve-forum.ru.
- 2. **Балдаев Л. Г.** Реновация и упрочнение деталей машин методами газотермического напыления. М.: KXT, 2004. 134 с.
- 3. **Каримов И.** Оценку ставит эксперт: Анализ результатов диагностики нефтепромыслового оборудо-

- вания на примере устьевой арматуры, отработавшей нормативный срок // Арматуростроение. 2011. № 5. C. 83—85.
- 4. Справочник по триботехнике / Под общ. ред. М. Хебды, А. В. Чичинадзе. В 3-х т. Т. 1: Теоретические основы. М.: Машиностроение; Варшава: ВКЛ, 1989. 400 с.
- 5. **Садовский В. Н.** Основания общей теории систем. М.: Наука, 1974. 341 с.
- 6. **Будински К.** Дж. Испытания на износ // Трибология: Исследования и приложения: опыт США и стран СНГ / Под ред. В. А. Белого, К. Лудемы, Н. К. Мышкина. М.: Машиностроение, Нью-Йорк: Аллертон пресс, 1993. С. 379—411.
- 7. **Эрозия** / Под ред. К. Прис. Пер. с англ. М.: Мир, 1982. 464 с.
- 8. **Николаев В. Н., Брук В. М.** Системотехника: методы и приложения Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1985. 199 с.
- 9. **Гессе Г.** Игра в бисер / Пер. с нем. М.: Радуга, 1984. 594 с.
- 10. **Пат. 2002151 Рос. Федерация:** МПК F16K 3/02. Запорный узел.
- 11. **Пат. 2463505 Рос. Федерация:** МПК F16K 3/02. Запорный узел "ИГР".
- 12. **Foster** Valve Corporation. 6445 Burlington North. Texas 77092. 48 p.

УДК 629.33

И. Ф. ДЬЯКОВ, д-р техн. наук (Ульяновский ГТУ), Ю. В. МОИСЕЕВ, канд. экон. наук (УВД, Ульяновск), e-mail: i.dyakov@ulstu.ru

Основы подрессоривания транспортных средств

Определены показатели плавности хода транспортного средства с подвеской с амортизатором и без него. Получен коэффициент затухания при гармонических колебаниях подрессоренной массы. Предложена новая конструкция и нагрузочная характеристика торсиона, обеспечивающего плавность хода и устойчивость транспортного средства.

Ключевые слова: торсион, устойчивость движения, время затухания, коэффициент динамичности, частота возмущений.

Indicators of the running smoothness of the vehicle with suspension with shock absorber and without it are determined. The attenuation coefficient is obtained with harmonic oscillations of the sprung mass. A new design and load characteristic of the torsion, ensuring running smoothness and stability of the vehicle, are proposed.

Keywords: torsion, motion stability, releasing time, dynamic factor, disturbance frequency.

Средства защиты автотранспортных средств от динамических воздействий являются проблемой, решение которой значительно повысит потребительские свойства автомобиля. Современная теория подрессоривания транспортных средств располагает аппаратом, который позволяет оценить параметры плавности хода по заданным характеристикам элементов подвески [1-4]. В проектном расчете жесткость рессор и сопротивление амортизаторов выбирают приближенно, а их значения уточняют после расчетной оценки плавности хода в заданных условиях эксплуатации, которые, однако, ввиду разнообразных условий эксплуатации практически невозможно учесть, так как параметры подвески не достигают оптимального значения. При увеличении жесткости рессор повышается коэффициент динамичности, при уменьшении возрастает амплитуда колебаний подрессоренной массы. Чем мягче подвеска автомобиля, тем больше амплитуда и чаще колебания автомобиля, причем происходят они с собственными частотами, а не со случайно меняющимися частотами возмущающей силы. В состоянии покоя сила тяжести F_i подрессоренной массы, приходящаяся на мост, уравновешивается противодействующей реакцией R_{Z_i} со стороны рессор и амортизатора (i=1,2) подвески

При выводе подрессоренной массы из равновесия нарушается равенство сил и возникает уравновешивающая сила $F_{\rm yp}$, равная разности сил F_i и R_{z_i} , которая приводит систему в движение к новому положению. Движущаяся система, обладая кинетической энергией, переходит из одного положения в другое, при этом меняется знак силы $F_{\rm yp}$ и возникают собственные колебания системы. Чтобы эти колебания были затухающими, применяют амортизаторы. Уравнение движения подрессоренной массы переднего моста i-й стороны на основании принципа Даламбера имеет вид:

$$m_{a_i} \ddot{z}_{\Pi_i} + (k_{\Pi_i} + k_{\Pi_i}) \dot{z}_{\Pi_i} + (c_{\Pi_i} + c_{\Pi_i}) z_{\Pi_i} \mp F_{f_i} = F_{yp},$$
 (1)

где
$$m_{a_i} = m_{\text{п.м}} \frac{l_2^2 + \rho_\chi^2}{L^2}$$
 — приведенная подрессорен-

ная масса, приходящаяся на передний мост i-й стороны транспортного средства относительно центра тяжести; $m_{\Pi.M}$ — подрессоренная масса; l_2 — расстояние от центра тяжести подрессоренной массы до задней опоры крепления заднего моста; L — база транспортного средства; ρ — радиус инерции подрессоренной массы относительно продольной оси; z_{Π_i} — обобщенная координата подрессоренной массы переднего моста с i-й стороны; k_{Π_i} и k_{Π_i} — коэффициенты демпфирования подвески и шины переднего моста с i-й стороны; c_{Π_i} и c_{Π_i} — коэффициенты жесткости подвески и шины с i-й стороны; F_{f_i} — сила трения в подвеске подрессоренной массы.

Предположим, что уравновешивающая сила $F_{\rm yp}=0$, сила трения $F_{f_i}=0$ и система находится в равновесии без учета амортизатора, тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$egin{aligned} m_{a_i} \ddot{z}_{\Pi_i} &+ (c_{\Pi_i} + c_{\mathbf{III}_i}) z_i = 0 \ \end{aligned}$$
 или $\ddot{z} + rac{(c_{\Pi_i} + c_{\mathbf{III}_i})}{m_{a_i}} z_i = 0.$

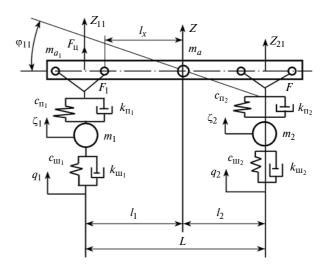


Рис. 1. Расчетная схема подвески транспортного средства

Если рассматривать систему с учетом углового перемещения и момента инерции, то получим уравнение

$$\frac{d^2 \varphi_0}{dt^2} + \frac{c_{\Pi_i} + c_{III_i}}{J_{\Pi_v}} d\varphi_0 = 0,$$
 (2)

где ϕ_0 — координата угла поворота неподрессоренной массы i-го моста; J_{Π_y} — момент инерции массы подрессоренной части i-го моста относительно поперечной оси Y.

Решением уравнения (2) будет уравнение

$$\varphi_{o} = \varphi_{11} \cos \left(t \sqrt{c_{\Pi p} / J_{\Pi_{y}}} \right) = \varphi_{11} \cos t \omega_{o}, \tag{3}$$

где ϕ_{11} — угол отклонения подрессоренной системы от начального положения равновесия (рис. 1) при t=0 и $\mathrm{d}\phi/\mathrm{d}t=0$; $\omega_{\mathrm{O}}=\sqrt{c_{\mathrm{\Pi}\mathrm{p}}/m_{\mathrm{\Pi}\mathrm{M}}}$ — частота собственных колебаний подрессоренной массы; $c_{\mathrm{\Pi}\mathrm{p}}$ — приведенная жесткость подвески.

Собственные частоты колебаний передней части подрессоренных масс выразим через массу и соответствующие жесткости подвески переднего моста:

$$\omega_{{\rm o}_1} = \sqrt{\frac{c_{{\rm \pi}_1} + c_{{\rm \pi}_2} \frac{l_1}{l_2}}{m_{a_1}}} \approx \sqrt{\frac{c_{{\rm \pi}_1}}{m_{a_1}}},$$

где c_{Π_1} , c_{Π_2} — жесткости подвесок переднего и заднего мостов; l_1 , l_2 — расстояния от центра тяжести до переднего и заднего мостов.

Уравнение (3) показывает, что если систему вывести из положения равновесия на угол ϕ_{11} , то она будет совершать незатухающие колебания по закону косинуса с периодом собственных колебаний,

соответствующих времени одного полного колебания системы:

$$T_{\rm o} = 2\pi/\omega_{\rm o} = 2\pi \sqrt{m_{a_i}/c_{\Pi_i}}$$
 (4)

Из уравнения (4) видно, что $T_{\rm O}$ зависит только от параметров m_{a_i} и c_{Π_i} : чем больше m_{a_i} и меньше c_{Π_i} , тем больше $T_{\rm O}$. Величина, обратная периоду колебаний, есть собственная частота незатухающих колебаний. Если система имеет амортизатор, то уравнение (1) можно записать так:

$$m_{a_i} \ddot{z}_{\Pi_i} + (k_{\Pi_i} + k_{\coprod_i}) \dot{z}_{\Pi_i} + (c_{\Pi_i} + c_{\coprod_i}) z_i = 0.$$

Характер движения подрессоренной массы полностью определяется степенью затухания и частотой собственных колебаний. Коэффициент затухания $k_{\rm 3аT}$ численно равен силе сопротивления подвески при скорости подрессоренной массы, равной единице ($\dot{z}=1$). Тогда условие степени затухания подрессоренных масс в зависимости от вибраций оценивается коэффициентом $k_{\rm B3}$ виброзащиты, равным отношению амплитуды $A_{\rm II}$ колебаний подрессоренной массы к амплитуде $A_{\rm H}$ неподрессоренной массы с учетом параметров демпфера:

$$k_{\rm B3} = A_{\rm II}/A_{\rm H} = \sqrt{\frac{\frac{\frac{\omega^2}{\omega^2}D^2 + 1}{\omega_{\rm o}^2}}{\frac{\omega^2}{\omega^2}D^2 + \left(\frac{\omega^2}{\omega_{\rm o}^2} - 1\right)^2}} < 1,$$

где D — коэффициент демпфирования, по физической сути соответствующий коэффициенту затухания; ω — текущее значение частоты колебаний.

С уменьшением коэффициента D коэффициент $k_{\rm B3}$ также уменьшается и стремится к минимуму, что улучшает виброзащиту транспортного средства при движении. Такую защиту от колебаний обеспечивают оптимальные подвеска и опоры крепления агрегатов, при использовании которых время затухания колебаний подрессоренных масс минимально. Изменение амплитуды колебаний в зависимости от частоты воздействия на подрессоренную массу показано на осциллограмме (рис. 2).

За критерий оптимальности подвески принимаем время $t_{3 \text{ат}}$ затухания [5], за которое амплитуда колебаний уменьшится до заданной минимальной величины:

$$t_{\text{3aT}} = \frac{1}{\varepsilon_{\text{3aT}} \omega_{\text{o}}} \ln \frac{1}{\lambda (1 - \varepsilon_{\text{3aT}}^2)} \rightarrow \min,$$

где $\varepsilon_{\text{зат}} = k_{\text{зат}}/(2m_{\text{п.м}}\omega_{\text{o}}) = k_{\text{зат}}/(2\sqrt{m_{\text{п.м}}c_{\text{п}_i}})$ — степень затухания; λ — коэффициент точности уста-

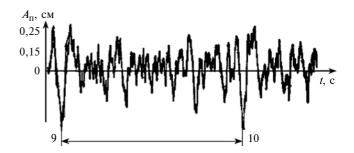


Рис. 2. Изменение амплитуды A_{Π} колебаний подрессоренной массы в зависимости от частоты воздействия неподрессоренных масс

новки подрессоренной массы в положение равновесия.

Обозначим силу сопротивления $F_{\text{conp}} = f(\dot{z})$ и, учитывая, что она направлена в сторону, противоположную скорости движения подрессоренной массы, получим дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами:

$$\ddot{z} = \frac{k_{3\text{aT}}}{m_{\text{IIM}}} \dot{z} + \omega_0^2 z \le [\ddot{z}], \tag{5}$$

где $[\ddot{z}] = A_\Pi \omega_0^2$ — допускаемое вертикальное ускорение; A_Π — амплитуда колебаний подрессоренной массы.

Если в уравнении (5) отношение $k_{\rm 3AT}/m_{\rm II.M}$ выразить через $\omega_{\rm O}$, то оно примет вид $\ddot{z}+2\beta_{\rm y}\omega_{\rm O}\dot{z}+\omega_{\rm O}^2z\leq [\ddot{z}]$, где $\beta_{\rm y}$ — коэффициент рассеивания энергии в гидравлическом амортизаторе. Кроме внешней возмущающей силы действует восстанавливающая сила, стремящаяся вернуть подрессоренную массу в положение равновесия. Если выразить возмущающую силу через $F_{\rm II}$ пентробежная сила, а восстанавливающую силу через $-c_{\rm II_i}z$ (знак "—" указывает, что эта сила всегда противодействует возмущающей силе), то уравнение движения без учета трения привет вид:

$$m_{a_i}\ddot{z} + c_{\Pi_i}z = F_{\Pi}\sin\omega t$$
.

Уравнение движения массы с амортизатором при угловом колебании имеет вид:

$$J_{\Pi_z} \frac{d^2 \alpha}{dt^2} + M_{3aT} + c_{\Pi_i} \alpha + \text{sign} M_{Tp} = 0,$$
 (6)

а при вертикальном колебании

$$m_{\text{II.M}} \frac{d^2 z}{dt^2} + F_{3\text{aT}} + c_{\Pi_i} z + \text{sign} F_{\text{Tp}} = 0,$$
 (7)

где J_{Π_Z} — приведенный момент инерции подрессоренной массы относительно оси Z; α и z — угло-

вые и вертикальные колебания подрессоренной массы; $M_{\rm 3aT}$ и $F_{\rm 3aT}$ — момент и сила затухания, возникающие при движении автотранспортного средства; $M_{\rm Tp}$ и $F_{\rm Tp}$ — момент и сила трения подвески.

Амортизатор создает момент затухания при крене автотранспортного средства или силу затухания, пропорциональные скорости перемещения его рабочего элемента. Так как амплитуды колебаний зависят от степени затухания, то выражения (6) и (7) можно привести к виду:

$$\frac{\mathrm{d}^2 \alpha}{\mathrm{d}t^2} + 2\beta_y \omega_0 \frac{\mathrm{d}\alpha}{\mathrm{d}t} + \frac{c_{\Pi_1}^{\alpha}}{J_{\Pi_z}} \alpha = 0; \tag{8}$$

$$\frac{d^{2}z}{dt^{2}} + 2\beta_{y}\omega_{o}\frac{dz}{dt} + \frac{c_{\Pi_{1}}^{z}}{J_{\Pi_{z}}}z = 0,$$
 (9)

где $c_{\Pi_1}^{\alpha}$ — угловая жесткость передней подвески; $c_{\Pi_1}^{z}$ — жесткость передней подвески относительно вертикальной оси Z.

В развитии теории колебаний можно выделить три этапа.

1. Центр тяжести статически уравновешенной колеблющейся подрессоренной массы должен находиться в равновесии. Так как он удален от осей переднего и заднего мостов на расстояния l_1 и l_2 , то при колебании относительно центра тяжести подрессоренной массы, приходящейся на передний мост, возникает центробежная сила

$$F_{II} = m_{\Pi,M} l_1 \ddot{\varphi}_{11}.$$

Угловое ускорение затухания $\ddot{\phi}_{11}$ передней части подрессоренной массы (см. рис. 2) по обобщенной координате определим из уравнения движения динамической системы:

$$\ddot{\varphi}_{11} = \frac{-\dot{\varphi}_{11} \sum_{i=1}^{n} k_{\Pi_{1}} - \varphi_{11} \sum_{i=1}^{n} c_{\Pi_{1}}}{m_{\Pi,M} l_{1}}.$$

Знак "—" показывает изменение направления угловой координаты ф относительно нейтральной оси. Центробежная сила при колебании меняет свое направление и создает дополнительное давление подрессоренной массы на подушки опор рессоры. Тогда, подставив уравнение (8) в равенство (9), получим:

$$F_{\rm II} = m_{\rm II.M} \left(\frac{l_2^2 - \rho_x^2}{I^2} \right) \frac{-\dot{\phi}_{11} \sum_{i=1}^n k_{\Pi_1} - \phi_{11} \sum_{i=1}^n c_{\Pi_1}}{m_{\Pi_1 M}}.$$

2. Согласно динамической теории виброустойчивости с учетом деформируемости подвески определим центробежную силу по формуле

$$F_{\rm II} = m_{\rm \Pi.M} k_{\rm ДИН} \left(\frac{l_2^2 - \rho_{\scriptscriptstyle X}^2}{L^2} \right) \frac{-\dot{\phi}_{11} \sum\limits_{i=1}^n k_{\rm \Pi_1} - \phi_{11} \sum\limits_{i=1}^n c_{\rm \Pi_1}}{m_{\rm \Pi.M}} \,, \label{eq:fitting}$$

где $k_{\text{дин}}$ — коэффициент динамичности.

Коэффициент динамичности зависит от периодов собственных колебаний подрессоренной $T_{\Pi.M}$ и неподрессоренной $T_{H.M}$ масс:

$$k_{\text{ДИН}} = \frac{1}{1 - (T_{\text{ПM}}^2 / T_{\text{HM}}^2)}.$$

Поэтому колебательную систему транспортного средства можно рассматривать как потенциально автоколебательную систему, у которой колебания с собственной частотой характеризуются переменными величинами амплитуд перемещений, скоростей и ускорений.

Кроме того, расчетные режимы колебательного процесса можно определить по интенсивности или напряженности колебаний. В этом смысле колебания подрессоренных и неподрессоренных масс можно рассматривать в первом приближении как непрерывные "резонансные" колебания с переменными амплитудами перемещений, скоростей и ускорений на основе спектрального метода расчета подрессоривания транспортных машин.

3. Спектральный метод расчета — важный этап развития теории подрессоривания транспортных средств. Представив подрессоренную и неподрессоренную массы в виде отдельных масс и определив их кинетические и потенциальные энергии, а также использовав уравнение Лагранжа второго рода, из выражений (1) и (2) можно составить матрицу перемещений масс. Задав частоты ω колебаний для каждой массы и выразив их реальные и мнимые части, получим амплитудно-фазо-частотные характеристики (АФЧХ) [5], по которым найдем переходные процессы и время затухания (рис. 3).

Колебания подрессоренной массы оцениваются коэффициентом интенсивности восприятия, который при гармонических колебаниях определяется по формуле [1]

$$K_{\text{ИНТ}} = \frac{18}{\sqrt{1 + (\omega_{\text{пр}}/\omega_{\text{o}})^2}} \, \sigma_{\ddot{z}} \leq [K_{\text{ИНТ}}],$$

где $\omega_{\rm пp} = 62,8~{\rm c}^{-1}$ — приведенная частота; $\sigma_{\ddot{z}}$ — среднеквадратическое отклонение массы по оси Z.

Если приподнять кузов параллельно самому себе в направлении оси Z, а затем внезапно опустить, то возникнут не только вертикальные перемеще-

ния z, но и угловые φ . Если силу приложить к центру масс, то возникнут только вертикальные перемещения без поворота.

Приравняв собственные частоты колебаний ω_{ζ} и ω_{ϕ} , можно получить условие равенства частот вертикальных и угловых колебаний в виде [2]:

$$(c_{\Pi_1} + c_{\Pi_2})m_{\Pi.M} = (c_{\Pi_1} l_1^2 + c_{\Pi_2} l_2^2)m_{\Pi.M}\rho^2.$$
 (10)

При этом принимаем, что колебания передних и задних подрессоренных частей независимы и справедливо условие $c_{\Pi_1} = c_{\Pi_2} \, l_1 l_2 / l_1$. Из равенства (10) находим, что вертикальные и угловые колебания будут равны при радиусе инерции $\rho^2 = l_1 l_2$.

Таким образом, при принятых выше ограничениях эквивалентную систему автотранспортного средства можно представить, как состоящую из двух подрессоренных передней $m_{\Pi,\Pi}$ и задней $m_{\Pi,3}$ масс, опирающихся соответственно на пружины с приведенными жесткостями. Колебания подрессоренных масс над передней и задней осями являются практически несвязанными и, следовательно, для нахождения частот свободных колебаний можно пользоваться формулой (10). Частота колебаний подрессоренной массы в минуту связана с угловой частотой ω_{Π} колебаний соотношением $n_{\Pi}=30\omega_{\Pi}/\pi=9,55\sqrt{c_{\Pi p}/m_{a_{i}}}$. Если выразить ее через статический прогиб δ_c рессор, то получим $n_{\Pi} = 9.55 \sqrt{m_{\Pi.M}g/(\delta_{\rm c} m_{\Pi.M})} \approx 300/\sqrt{\delta_{\rm c}}$, где $n_{\Pi} = 55 \div 80 \text{ мин}^{-1}$ — для передней оси и $n_{3} =$ $= 68 \div 100 \text{ мин}^{-1}$ — для задней оси.

Частота собственных колебаний кузова достаточно хорошо оценивает плавность хода автомобиля, поэтому ее используют, как правило, для определения жесткости подвески. Комфортабельной является частота $n \approx 60$ мин $^{-1}$. Зная статическую нагрузку на рессору, легко определить жесткость подвески. Динамический прогиб $f_{\rm д}$ подвески (до сбитого буфера при "пробое"), рассчитанный с учетом эмпирических соотношений, не должен превышать $(0,8\div1,0)\delta_{\rm c}$, где $\delta_{\rm c}$ — статический прогиб подвески для грузовых автомобилей.

Для обеспечения комфортабельного движения транспортного средства используют торсион [6]. Торсионная подвеска имеет ряд достоинств по сравнению с листовыми рессорами: при равной энергоемкости торсионы имеют меньшую массу, а по сравнению со спиральными пружинами обеспечивают лучшее компоновочное решение подвески, особенно подвески ведущих осей автомобиля.

Известны пучковые и пластинчатые [1] торсионы, представляющие собой рессору кручения, ко-

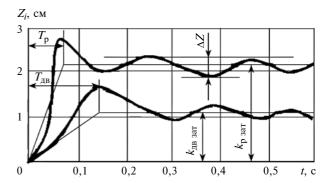


Рис. 3. Переходной процесс вертикальных колебаний рамы и лвигателя

торые состоят из нескольких стержней круглого сечения с шестигранными головками или соединенных между собой пластин.

Недостатком этих конструкций является то, что они не обеспечивают постоянную собственную частоту колебаний подрессоренной массы при малых виброперемещениях независимо от статической нагрузки. Кроме того, существенным недостатком всех используемых торсионов является то, что при наезде на препятствие одного колеса через рычаг торсиона вызывается отрыв от дорожного полотна колеса с другой стороны, т. е. теряется контакт с дорожным покрытием и ухудшается управляемость транспортным средством.

Применение торсионов повышает плавность хода и устойчивость движения транспортного средства, влияющие на вибрационную безопасность человека и транспортного средства, когда полезная нагрузка меняется в широких пределах. Результат достигается за счет того, что дополнительный элемент подвески в виде торсиона выполнен из пружины с переменным шагом, работающей на кручение, что обеспечивает постоянную собственную частоту колебаний при малых виброперемещениях независимо от статической нагрузки и устойчивость управления.

На рис. 4, а и б приведены конструктивная схема торсиона и нагрузочная характеристика предлагаемого дополнительного упругого элемента. Торсион состоит из двух частей. Одна часть содержит пружину 1, работающую на кручение, которая имеет витки с переменным шагом и установлена в цилиндрическом корпусе 2. Для обеспечения ее устойчивости в поперечном направлении при кручении в пружину устанавливается усеченный конусный шток 3, диаметр основания которого на 2d, а вершины — на 3d меньше диаметра D пружины, где d — диаметр проволоки пружины. Один конец пружины 1 соединен с рычагом 4, который жестко связан с мостом транспортного средства и действует на одно из колес. Второй конец пружины соединен с диском 5, который жестко связан с подрес-

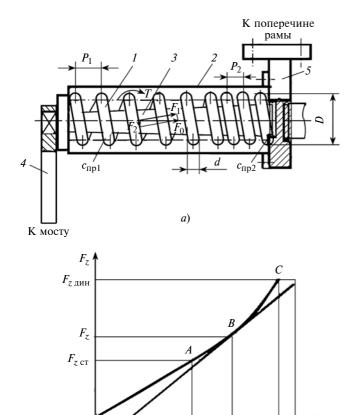


Рис. 4. Конструктивная схема торсиона (a) и его нагрузочная характеристика (δ)

 $h_{z \text{ cT}}$

 \hat{h}_z

 $h_{z \text{ дин}}$

 $h'_{z \text{ дин}}$

соренной частью в середине рамы транспортного средства. Один конец усеченного конусного што-ка 3 торсиона крепится к диску 5 и действует на второе колесо. Рычаг 4 также жестко соединен с этим концом усеченного конусного штока 3, а его второй конец свободно входит в отверстие диска 5. При этом витки пружины 1 с меньшим шагом находятся со стороны диска 5, а с большим шагом — со стороны рычага 4, что обеспечивает постоянный контакт колес с дорожным покрытием.

Для обеспечения плавности хода транспортного средства необходимо, чтобы нагрузочная характеристика торсиона (рис. 4, δ) соответствовала изохронной подвеске. Характеристика торсиона должна проходить через точку A с координатами $h_{\rm zcr}$; $F_{\rm cr}$ ($h_{\rm zcr}$ — статический прогиб подвески; $F_{\rm cr}$ — вертикальная статическая нагрузка), а для избежания ударов в ограничитель хода заканчиваться в точке C с координатами ($h_{\rm zдин}$; $F_{\rm дин}$), определяемой коэффициентами динамичности подвески по прогибу $k_{\rm дин}h = h_{\rm zдин}/h_{\rm zcr}$ и силе $k_{\rm дин}F = F_{\rm дин}/F_{\rm cr}$. Следовательно, нагрузочная характеристика торсиона без нижнего и верхнего ограничителей хода (буферов) должна иметь вид экспоненты. Требуемый

коэффициент $k_{\text{дин}F}$ можно получить при линейной нагрузочной характеристике, но при этом динамический прогиб будет больше допускаемого, что трудно осуществить конструктивно. Постоянная плавность хода обеспечивается при неизменном статическом прогибе (собственной частоте). В этом случае для произвольной точки B (рис. 4, δ) должно выполняться равенство $F_{\rm o}/c_{\rm пр.y}=h_z'=h_{z{\rm cr}}$, где $c_{\rm пр.y}={\rm d}F_{\rm o}/{\rm d}h_z$ — коэффициент жесткости упругого устройства подвески в этой точке. Данное равенство приведем к виду ${\rm d}F_{\rm o}/F_{\rm o}={\rm d}h_z/h_{z{\rm cr}}$ и, решив это уравнение при начальных условиях $h_z=h_{z{\rm cr}}$ и $F_{\rm o}=F_{\rm cr}$, получим:

$$F_{\rm o}(h_z) = F_{\rm cr} \exp\left(\frac{h_z - h_{z \, \rm cr}}{h_{z \, \rm cr}}\right).$$

Таким образом, нагрузочная характеристика, которая изменяется по закону показательной функции при $F_{\rm O} \ge F_{\rm CT}$, обеспечит постоянную собствен-

ную частоту колебаний
$$f_{\rm Z}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{g}{h_{\rm ZCT}}}\,,$$
 где g —

ускорение свободного падения.

Нагрузочные характеристики с дополнительными упругими элементами предлагаемой конструкции можно использовать для корректировки этой характеристики при значительном превышении максимальной статической нагрузки по сравнению с минимальной. Поэтому переменные шаги P_1 и P_2 пружины I позволяют скорректировать ее общую жесткость ($c_{\rm np1} + c_{\rm np2}$), а при расчетах следует использовать приведенный коэффициент

жесткости
$$c_{\rm пp} = \frac{c_{\rm пp1} c_{\rm пp2}}{c_{\rm пp1} + c_{\rm np2}}$$
 подвески в статичес-

ком положении. Учитывая, что $F_{\rm ct} = c_{\rm пр} i h_{z\rm ct}$ (где $h_{z\rm ct}$ — эквивалентный статический прогиб) соответствует собственной частоте f_z колебаний подрессоренной массы, можно определить приведенный коэффициент жесткости предлагаемого торсиона

$$c_{
m пp}^{
m T} = c_{
m пp} i rac{h_{z
m cT}}{h_{z
m доп}} igg(k_{
m дин}{}_F - 1 - rac{h_{z
m дин}}{h_{z
m cT}}igg),$$
 где $h_{z
m доп}$ —

прогиб дополнительного упругого элемента при сжатии подвески. Эквивалентный статический прогиб $h_{\rm zct}$ при нелинейной нагрузочной характеристике упругого элемента характеризует плавность хода и не зависит от изменения полезной нагрузки.

Торсион работает следующим образом. При движении транспортного средства по неровной дороге возникают динамические нагрузки. Подвеска из зоны статики переходит в зону динамики. При этом кроме элементов подвески в работу вступают

дополнительные элементы пружинного торсиона 1 на кручение. Через поперечные сечения витков передается момент T, равный внешнему моменту от колеса, закручивающему пружину 1, вектор которого направлен вдоль ее оси и равен F_0 . При разложении момента T (рис. 4, a) по оси и перпендикулярно к ней в поперечном сечении витка пружины возникают крутящий $T_{\rm kp} = T {
m sin} \alpha$ и изгибающий $M_{\rm H3} = Tr_{\rm IID} \cos\alpha$ моменты, где r = D/2, D — диаметр пружины; α — угол подъема витков. Так как угол $\alpha < 10 \div 12^\circ$, то момент $M_{\rm H3}$ значительно меньше момента $T_{\rm Kp}$, а поперечная сила F_2 значительно меньше продольной силы F_0 . Продольная сила $F_0 = 2T/D$. При увеличении силы F_2 закручивания происходит принудительное перемещение витков вдоль оси в сторону основания усеченного конусного штока 3, шаг P_2 и диаметр витков пружины уменьшаются и витки смыкаются, образуя замкнутый цилиндр. Жесткость пружины, свитой из проволоки круглого поперечного сечения [3], определяется по формуле

$$c_{\text{IID}}^{\Pi} = Gd^4/(8D^3n),$$

где G — модуль упругости материала проволоки пружины, для стали G = 80 000 МПа; d — диаметр проволоки; n — число рабочих витков.

Для данного случая: деформация пружины $\lambda = F_{\rm o}/c_{\rm np}^{\rm n}$; жесткость одного витка пружины $c_1 = Gd/(8\,c_{\rm инд}^3)$, где $c_{\rm инд} = D/d$ — индекс пружины; $n = c_1/c_{\rm np}^{\rm n}$ — число рабочих витков. При заданном угле ϕ , рад, закручивания пружины требуемое число рабочих витков определяют по формуле

$$n = \varphi G J_{KD} / (\pi D T),$$

где $J_{\rm Kp}$ — полярный момент инерции площади сечения витка при кручении.

При работе на кручение диаметр проволоки определяют по формуле

$$d = 2,54\sqrt{kc_{\text{инд}}F_{\text{O}}/[\tau]},$$

где k — коэффициент влияния кривизны витков, который принимают в зависимости от индекса пружины; [τ] — допускаемое напряжение при кручении витка.

Шаг $P_i = d + \Delta$ витков пружины зависит от зазора Δ между ними: чем больше зазор, тем большая осевая сила требуется для смыкания витков.

При изменении осевой силы от ${F_0}_1$ до ${F_0}_2$ витки смыкаются, и число рабочих витков становится

равным единице, что соответствует замкнутому цилиндру. При этом жесткость пружины I возрастает пропорционально числу рабочих витков. Если с одной стороны пружины I шаг витков больше, чем с другой, то вначале смыкаются витки с меньшим шагом P_2 , а потом с большим шагом P_1 . Шаги P_1 и P_2 пружины подбирают по нагрузочной характеристике транспортного средства так, чтобы частота собственных колебаний подрессоренной массы была постоянной. При этом подвеска транспортного средства работает в режиме плавности хода при переменных нагрузках [6].

Заключение

Жесткость торсионной подвески и характер ее изменения зависят от: места установки торсиона, т. е. с нижним или верхним рычагом он соединен; конструктивной схемы направляющего устройства и, прежде всего, углов наклона верхнего и нижнего рычагов. Считают, что торсионная подвеска имеет, как правило, прогрессивную характеристику, т. е. ее жесткость возрастает с увеличением прогиба. В действительности в большинстве случаев при трапециевидной схеме направляющего устройства торсионная подвеска имеет или очень малопрогрессивную характеристику, или даже регрессивную, т. е. жесткость подвески уменьшается с увеличением деформации.

Практические расчеты оптимальных параметров подвесок транспортных средств требуют разных алгоритмов. Поэтому все параметры подвески, представленные в виде ограничений, разбиваются на интервалы, каждый из которых соответствует определенному интервалу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Проектирование** полноприводных колесных машин. Т. 1—3 / Под общ. ред. А. А. Полунгяна. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. 328 с.
- 2. **Раймпель И.** Шасси автомобиля: конструкция подвески: Пер. с нем. В. П. Агапова. М.: Машиностроение, 1989. 328 с.
- 3. **Ружичка Дж., Дерби Т.** Виброизоляция с нелинейным демпфированием: Пер. с англ. К. А. Выгодского. М.: ОНТИ, 1973. № 609. 42 с.
- 4. **Белоусов Б. Н., Шухман С. Б.** Прикладная механика наземных тягово-транспортных средств с мехатронными системами. М.: Агроконсалт, 2013. 610 с.
- 5. Дьяков И. Ф. Основы оптимизации в автомобилестроении. М.: Машиностроение, 2012. 386 с.
- 6. **Пат. 2509238 Рос. Федерация:** МПК F16F 1/44. Торсион для подрессоривания транспортного средства.

Конструкция и расчет термомеханического съемника

Разработана конструкция съемника с рабочим усилием 400 кН и свободным перемещением штока до 6 мм, предназначенного для выпрессовки крыльчатки нагнетателя с конического хвостовика вала насоса для перекачки газа по магистральному газопроводу. Силовой привод устройства состоит из трех трубчатых элементов, в которых инициирована возвратная память при сжатии. Расчет основывается на методе термомеханических диаграмм.

Ключевые слова: термомеханический возврат, деформация, напряжение, память формы, термомеханическая диаграмма, температура, мартенсит, аустенит, объем памяти, усилие.

The design of the puller with a working force of 400 kN and the free movement of the rod up to 6 mm, designed to press the impeller of the supercharger off the conical shank of the pump shaft for pumping gas through the main gas pipeline. The power drive of the device consists of three tubular elements in which the return memory is initiated during compression. The calculation is based on the method of thermomechanical diagrams.

Keywords: thermomechanical return, deformation, stress, shape memory, thermomechanical diagram, temperature, martensite, austenite, memory size, force.

Сплавы на основе никелида титана с эффектом памяти формы очень привлекательны для создания специальных силовых устройств ввиду их высокой надежности, простоты конструкции и миниатюрности. Эти материалы отличаются высоким уровнем термомеханических, антикоррозионных и механических свойств, а также термостабильностью.

Термомеханический съемник должен развивать пиковое усилие на штоке при многоразовом применении. Величина усилия определяется энергетикой сплава при реализации термомеханического возврата и размерами силового привода. Для обеспечения работоспособности фазовые превращения в материале должны проходить только в заданном интервале температур при естественном охлаждении. Данные задачи решаются при проектировании силового привода в соответствии с его термомеханическими характеристиками. Рассмотрим для понимания вопроса элементы сертификании сплава.

Память формы — это эффект частичного или полного возврата к исходному состоянию детали, деформированной при температуре ниже интервала прямого мартенситного превращения, при нагреве в температурном интервале обратного мартенситного превращения. При этом сплав в деформированном состоянии может находиться достаточно долго. Если создать препятствие процессу восста-

новления, то при нагреве в силовом элементе возникают реактивные напряжения. В этих сплавах точки фазовых превращений определяются температурами начала и конца перестройки кристаллической решетки при нагревании и охлаждении. Для силовых приводов, как правило, используют сплав TH1 с интервалом фазовых переходов в области температур $50 \div 90$ °C.

Реализация эффекта памяти образца при заданной деформации растяжением показана на рис. 1. Поскольку интервал температур прямого мартенситного превращения находится выше точки нормальной температуры $T_{\rm H} = 20~^{\circ}{\rm C}$, то его деформацию проводят в обычных условиях. После снятия задающего усилия наблюдается упругая разгрузка образца. При нагревании в свободном состоянии в интервале температур начала (A_{H}) и конца (A_{K}) обратного мартенситного превращения происходит сжатие образца до первоначального размера в результате фазового перехода мартенсита в высокотемпературную фазу — аустенит. Этот процесс заканчивается в точке A_{K} , где сплав уже полностью находится в аустените. При нагреве выше данной точки размер уже не изменяется. При реализации термомеханического возврата в свободном состоя-

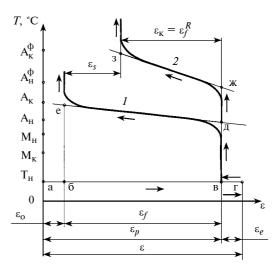


Рис. 1. Диаграммы термического восстановления формы образца в свободном состоянии (1) и при противодействии (2):

 ${\rm M_H}, {\rm M_K}$ — начальная и конечная температуры прямого мартенситного превращения; ${\rm A_H}, {\rm A_K}$ — температуры начала и конца обратного мартенситного превращения при нагреве; ${\rm A_H^{\varphi}}, {\rm A_K^{\varphi}}$ — температуры начала и конца восстановления формы; $T_{\rm H}$ — температура деформации (нормальная 20 °C); $\epsilon_{\rm S}$ и $\epsilon_{\rm K}$ — деформации недовосстановления и контактирующей детали вследствие ее противодействия; ϵ_f и ϵ_f^R — деформации термического восстановления в свободном состоянии и при наличии противодействия; ϵ_0 и ϵ_e — остаточная деформация и деформация упругого восстановления; ϵ_p и ϵ — пластическая и заданная деформации

нии (кривая I на рис. 1) деформация ε_f термического восстановления формы может быть меньше заданной (пластической) деформации $\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e$ на величину некоторой остаточной деформации $\varepsilon_0 = \varepsilon_p - \varepsilon_f$

Фазовый переход мартенсита в аустенит при нагревании в условиях противодействия осуществляется по кривой 2 и определяется не только температурой, но и напряжением. Поэтому температуры начала $(A_{\rm H}^{\Phi})$ и конца $(A_{\rm K}^{\Phi})$ восстановления формы (особенно точка $A_{\rm K}^{\Phi})$ по сравнению с температурами $A_{\rm H}$ и $A_{\rm K}$ возрастают. Из-за определенной величины деформации $\varepsilon_{\it S}$ недовосстановления, которая зависит от жесткости сопротивления, деформация $\varepsilon_{\it f}^{\it R}$ термического восстановления по сравнению с реализацией процесса в свободном состоянии снижается:

$$\varepsilon_f^R < \varepsilon_f;$$

$$\varepsilon_f^R = \varepsilon_p - \varepsilon_s - \varepsilon_0.$$

Величина же $\varepsilon_f^R = \varepsilon_K$ определяется деформацией детали, находящейся в контакте с образцом.

Для никелида титана объем памяти формы составляет $\epsilon_V^+ = 0.08$ при заданной деформации растяжением и $\epsilon_V^- = 0.04$ при сжатии. Под объемом памяти ϵ_V^- понимают критическую деформацию, при которой еще возможно практически полное восстановление исходного размера детали. Катаный пруток диаметром до 40 мм способен генерировать реактивные напряжения возврата при растяжении в условиях абсолютно жесткого противодействия величиной $\sigma_R^- = 300\div400\,$ МПа, а при сжатии соответственно $\sigma_R^- = 400\div500\,$ МПа. При получении трубной заготовки методом двойного изостатического выдавливания реактивные напряжения возврата возрастают в $1.3\div1.4$ раза [1].

Основной деформационно-силовой характеристикой сплавов с памятью формы в интервале фазовых превращений является термомеханическая диаграмма. Она представляет собой зависимость реактивных напряжений возврата от деформации недовосстановления. Ее определяют при сертификации материала в результате испытания серии образцов при заданной деформации растяжением [2].

Для построения этой зависимости берется партия образцов одной плавки, одинакового химического состава и термообработки, изготовленных по единой технологии. Каждый образец из сплава ТН1 деформируется в мартенсите на заданную деформацию при температуре $T_{\rm H}=20$ °C. После упругой разгрузки до нуля образец закрепляют и нагревают выше температуры ${\rm A}_{\rm K}^{\Phi}$. Процесс генерирования напряжений возврата схематично показан линиями $BM,\ JL,\ HC,\ KD$ на рис. 2. В результате статистической обработки совокупность точек $\{M,\ L,\ C,\ D\}$ может быть описана функцией $\sigma_R=f(\varepsilon_s)$. Методи-

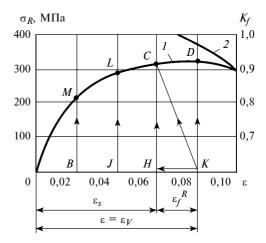


Рис. 2. Графическая иллюстрация методики построения термомеханической диаграммы (1) и определения объема памяти формы (2)

чески и технически термомеханическую диаграмму I получают при условии абсолютно жесткого противодействия при измерении рабочей длины образца после его упругой разгрузки, так как $\varepsilon_s = \varepsilon - \varepsilon_0$.

Величина реактивного напряжения однозначна и не зависит от пути реализации термомеханического возврата, что показано линиями KC, KHC и HC на рис. 2.

При построении зависимости I, как правило, рассматривают интервал заданной деформации до объема памяти $\varepsilon < \varepsilon_V$, где напряжение σ_R достигает своего максимума, а затем начинает снижаться. Восходящую ветвь диаграммы I в инженерной практике, как правило, описывают степенной функцией по аналогии с кривой растяжения [2]:

$$\sigma_{R} = A \varepsilon_{s}^{m}, \qquad (1)$$

где A и m — коэффициенты, учитывающие особенности структуры, химического состава и термической обработки.

Зависимость 1 получают по данным испытаний партии из n=20 образцов при их статистической обработке на основе корреляционного и линейного регрессионного анализов по методике работы [3].

Отметим, что кривая растяжения сплава в мартенсите лежит ниже функции (1). Характер диаграммы и величина напряжений возврата зависят от вида заданной деформации. Так как стандартную диаграмму получают при растяжении, то для другого вида деформации ее следует пересчитать по формулам работы [2] или определить по результатам соответствующих испытаний. Так, для заданной деформации сжатием имеем:

$$m^-=rac{1}{2}\,nm^+-\left(1-rac{n}{2}
ight);$$
 $A^-=2^{m^+}nA^+(0,04)^{\left(1-rac{n}{2}
ight)(m^++1)},$ где $n=1,5\div 1,7.$

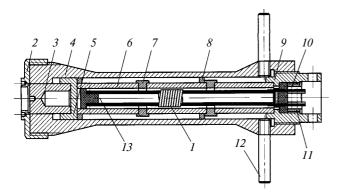


Рис. 3. Термомеханический съемник на обратимой памяти с тремя трубчатыми силовыми элементами из сплава ТН1

На рис. 2 также показано определение объема памяти формы как точки заметного снижения коэффициента термического восстановления $K_f = L_f/L$, где L — размер образца в исходном состоянии, L_f — длина образца после свободного восстановления при нагреве до температуры A_K . Обычно K_f должен составлять не менее $0.96 \div 0.98$.

На основании термомеханической диаграммы определяют рабочую характеристику силового привода и его основные размеры. При проектировании, как правило, задают наибольшее перемещения δ штока, что позволяет вычислить рабочее усилие P силового устройства:

$$P = AS_3 \varepsilon_s^m / K; \quad \varepsilon_s = \varepsilon_V - \delta / KnL_3,$$

где $S_{\mathfrak{I}}$ — площадь поперечного сечения силового элемента; $L_{\mathfrak{I}}$, n — длина силового элемента и их число; K — коэффициент, учитывающий увеличение смещения штока, например, из-за применения рычага.

Как правило, деформация недовосстановления должна составлять не менее $\varepsilon_s = \varepsilon_V/2$.

На рис. 3 представлена оригинальная конструкция термомеханического съемника с рабочим усилием $P=400~\rm kH$ и свободным перемещением до 6 мм. Он предназначен для выпрессовки крыльчатки нагнетателя диаметром 800 мм с вала агрегата для перекачки газа по магистральному газопроводу.

Эксплуатация на практике опытной партии этих устройств вместо штатного гидравлического оборудования позволила существенно снизить стоимость ремонтных и монтажных работ в результате упрощения технологии, уменьшения числа обслуживающего персонала, увеличения долговечности оборудования и снижения его стоимости (вследствие исключения маслонасосной станции, а также подводящих коммуникаций, перевозимых на грузовой автомашине марки УАЗ).

Термомеханический съемник состоит из набора трех силовых элементов 6 с дистанционными центрирующими кольцами 7 и установочными кольцами 8, ползуна 5 со штоком 3, силового корпуса 4

с упорной резьбовой крышкой 9 и рукояткой 12 и спирального электронагревателя I с двумя контактами 10 и изоляторами 11, а также керамическим изолятором 13. Для силового привода используется набор коротких трубчатых элементов из сплава TH1 с возвратной памятью, так как короткие элементы более технологичны при изготовлении и деформационной термической обработке (тренировке).

Установка необходимой длины силового набора и центрирование элементов осуществляются с помощью колец 7, а их соосное расположение достигается с помощью колец δ .

Двухсторонний эффект памяти или обратимая память — это свойство материала многократно изменять, а также восстанавливать свою форму в процессе охлаждения и нагревания в интервале фазовых переходов. Для данного вида термомеханического возврата роль внешнего усилия играют дефекты различной природы. Поэтому источник внутренних напряжений можно создать специальной деформационной и термической обработкой (тренировкой). Такой материал изменяет свою форму при нагревании и вновь возвращается к ней при охлаждении без какого-либо воздействия внешней нагрузки. Объем обратимой памяти в 5÷10 раз меньше, чем прямой памяти, и составляет для никелида титана порядка 0,010÷0,015.

Для съема крыльчатки с вала перекачивающего насоса после снятия защитного колпачка 2 (см. рис. 3) съемник по резьбе вкручивается в отверстие кока крыльчатки до упора в вал согласно рис. 4. В результате нагрева до температуры $A_{\rm K}^{\Phi}$ силовые элементы 6 (см. рис. 3) с инициированной сжатием возвратной памятью пытаются удлиниться. Упираясь в торец вала насоса, они развивают полезное усилие на штоке, что и приводит к снятию крыльчатки нагнетателя с конического участка вала.

Вес съемника 120 H, время срабатывания до 5 мин, напряжение нагревателя — 36 B для обеспечения пожарной безопасности. Съемник также снабжается дополнительным комплектом из трех силовых элементов 6.

Наружный диаметр D и толщина стенки h силового элемента составляют соответственно 65 и $10\,$ мм, что обеспечивает их достаточно равномерный нагрев.

При температуре выше 280 °C происходит существенное уменьшение реактивных напряжений из-за "склероза" памяти. Поэтому мощность спирального электронагревателя с учетом внутренней тепловой изоляции корпуса подбирают таким образом, чтобы силовые элементы нагревались не выше 180÷200 °C. Такой температуры вполне достаточно для срабатывания съемника, что также гарантирует сохранение его работоспособности. Кроме того, рекомендуется сразу отключать электропитание после срабатывания устройства.

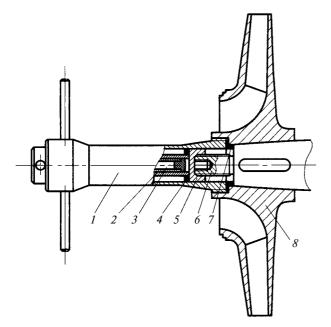


Рис. 4. Положение термомеханического съемника при выпрессовке колеса нагнетателя с конического хвостовика вала:

1 — корпус; 2 — силовой элемент; 3 — нагреватель; 4 — установочное кольцо; 5 — ползун; 6 — резьбовой конец хвостовика вала нагнетателя; 7 — опорная втулка; 8 — крыльчатка

Термомеханическую диаграмму при заданной деформации сжатием получали в результате натурных испытаний партии силовых элементов после их тренировки и инициирования в них возвратной памяти. Так как величина реактивного напряжения не зависит от пути реализации термомеханического возврата в силу одновариантности обратного превращения [4], то диаграмму определяли при задании деформации недовосстановления вследствие выборки начального зазора *z* между силовым элементом и опорой испытательной машины:

$$\varepsilon_{\rm S} = \varepsilon_{\rm V} - z/L_{\rm B}$$

Основная задача силового устройства состоит в том, чтобы развить пиковое усилие на штоке. Таким образом, при проектировании необходимо определить его реальную величину с учетом потерь от деформаций корпуса съемника и резьбы в соединениях. Удлинение корпуса при нагружении с учетом податливости резьбы составляет:

$$\delta_{K} = \chi P = \left(\frac{L_{1}}{E_{K}S_{K}} + \lambda_{1p} + \lambda_{2p}\right) P,$$

где λ_{1p} , λ_{2p} — податливости резьбовых соединений; $E_{\rm K}$, $S_{\rm K}$, L_1 — соответственно модуль упругости, площадь поперечного сечения и длина тонкой части корпуса.

Коэффициенты податливости резьбы можно определить по приближенной формуле И. Г. Старостина [5]

$$\lambda_{\rm p} = \frac{0.49}{d_2 E} \sqrt{1.44 + 9.28 p/d},$$

где d, d_2 , p — наружный и средний диаметры резьбы и ее шаг.

Для резьбового соединения стального корпуса с колесом из алюминиевого сплава используют приведенный модуль

$$1/E = (1/E_1 + 1/E_2)/2.$$

Учитывая, что

$$\varepsilon_{\rm K} = \varepsilon_f^R = (\varepsilon_V - \varepsilon_s)n,$$

фактическую величину усилия на штоке съемника находим из уравнения

$$\left(\frac{P}{AS_3}\right)^{1/m} + \frac{\chi}{nL_3}P - \varepsilon_V = 0. \tag{2}$$

Коэффициенты термомеханической диаграммы сплава ТН1 в результате тренировки силовых элементов на обратимую память при заданной деформации сжатием составляют: A = 2117 МПа, m = 0.518 и $\varepsilon_V = 0.0146$.

Модули упругости для стального корпуса, резьбовой упорной крышки и крыльчатки из алюминиевого сплава равны: $E_{\rm K}=E_1=2\cdot 10^5~{\rm M}\Pi{\rm a},$ $E_{\rm an}=0.72\cdot 10^5~{\rm M}\Pi{\rm a}.$ Тонкая часть корпуса съемника имеет наружный и внутренний диаметры 110 и 80 мм при длине $L_1=300~{\rm mm}.$ Для наружной резьбы корпуса М140×3 длиной $L_{\rm 1p}=45~{\rm mm}$ ($d_2=138.38~{\rm mm})$ имеем $\lambda_{\rm 1p}=0.428\times 10^{-7}~{\rm mm/H}.$ Для резьбового соединения корпус — упорная крышка М100×3 мм длиной $L_{\rm 2p}=36~{\rm mm}$ при p/d=0.03 имеем $\lambda_{\rm 2p}=0.326\times 10^{-7}~{\rm mm/H}.$ Длина силового элемента $L_{\rm 3}=130~{\rm mm}.$

Из решения уравнения (2) находим $P=40~{\rm kH}$. Свободный ход штока составляет $\delta=5,7~{\rm mm}$.

В заключение отметим, что подобные съемники, но с другими узлами захвата используются также для съема с вала гребных винтов кораблей. При наличии специального приспособления такие силовые устройства применяют и для тарированной затяжки коротких шпилек и болтов большого диаметра.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Хасьянов У., Шишкин С. В., Хасьянова Д. У.** Формование и ВТМ обработка пустотелых заготовок из сплавов с ЭПФ // Неделя металлов в Москве: Сборник трудов. М., 2009. С. 374—379.
- 2. **Шишкин С. В., Махутов Н. А.** Расчет и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы. М.: НИЦ "Регулярная и хаотическая динамика", 2007. 412 с.
- 3. **Степнов М. Н.** Статистическая обработка результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 1972. 232 с.
- 4. **Лихачев В. А., Кузьмин С. Л., Каменцева З. П.** Эффект памяти формы. Л.: ЛГУ, 1987. 216 с.
- 5. **Биргер И. А., Иосилевич Г. Б.** Резьбовые соединения. М.: Машиностроение, 1973. 254 с.

О. М. УСТАРХАНОВ, М. М. БАТДАЛОВ, доктора технических наук, Х. М. МУСЕЛЕМОВ, канд. техн. наук, Т. О. УСТАРХАНОВ (Дагестанский ГТУ, г. Махачкала), e-mail: hairulla213@mail.ru

Экспериментальные исследования трехслойных труб¹

По результатам экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния трехслойных труб оценена возможность их применения для транспортировки различных сред.

Ключевые слова: трехслойная труба, гофр, внутренний слой, наружный слой.

According to the results of experimental studies of the stress-strain state of three-layer pipes, the possibility of their use for transporting of various media is evaluated.

Keywords: three-layer pipe, corrugations, inner layer, outer layer.

Одними из наиболее материалоемких конструкций являются трубопроводы, для производства которых необходимо большое количество металла.

Трубопровод — инженерное сооружение, предназначенное для транспортировки газообразных и жидких веществ, пылевидных и разжиженных масс, а также твердого топлива и иных твердых веществ в виде раствора под воздействием разницы давлений в поперечных сечениях трубы. В России трубопроводный транспорт считается частью транспортной инфраструктуры.

В настоящее время самыми крупными считаются магистральные трубопроводы протяженностью свыше 50 км и диаметром от 219 до 1220 мм, предназначенные для транспортировки товарной нефти или газа из районов добычи до мест потребления или перевалки на другой вид транспорта [1—5].

В данной статье приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) трехслойных труб.

Как было отмечено выше, одним из недостатков трубопроводов, особенно большого диаметра, является значительный расход стали для их изготовления. Даже небольшое увеличение диаметра трубопровода приводит к существенному увеличению общего расхода стали, особенно для газопроводов и нефтепроводов большой протяженности [6—8]. Исследования, проводимые на кафедре строительных конструкций и гидротехнических сооружений (СКиГТС) Дагестанского государственного технического университета (ДГТУ), показали, что массу трубопроводов можно уменьшить, применяя для этого трехслойную конструкцию. Как известно, трехслойные элементы при малой массе обладают повышенной жесткостью, что позволяет получить

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке грантом Президента Российской Федерации (МК-6112.2018.8).

значительный выигрыш в массе для конструкций, воспринимающих различные усилия. Кроме того, во многих случаях многослойные пакеты имеют высокие теплоизолирующие, звукоизолирующие и другие свойства, что является немаловажным фактором при эксплуатации ряда современных изделий различного назначения. Опыт эксплуатации конструкций из трехслойных пакетов показал их высокую эффективность, а в ряде случаев и незаменимость.

В процессе эксплуатации магистральные трубопроводы подвергаются воздействию силовых факторов, которые в той или иной степени влияют на условия работы конструкции [8—12]. При расчете необходимо оценить значение этих факторов и их влияние на предельное состояние трубопроводов. К числу таких силовых воздействий относятся: внутреннее давление, продольные растягивающие и сжимающие усилия, изгиб трубопровода в соответствии с рельефом местности, давление грунта при засыпке трубы и воздействие подвижных нагрузок и т. д.

Для оценки возможности применения трехслойных труб (ТТ) для транспортировки различных сред были проведены экспериментальные исследования. При этом определяли НДС в элементах фрагмента трехслойной трубы от действия внутреннего давления. Образец трехслойной трубы состоял из трех элементов (рис. 1): внешнего несущего слоя I; внутреннего несущего слоя I; внутреннего несущего слоя I в виде гофра.

Экспериментальные исследования начинают с планирования эксперимента, при котором учитывают технологии изготовления испытуемых образцов, их размеры и число, подготовку измерительного комплекса и т. д. Размеры модели ТТ должны



Рис. 1. Образцы трехслойных труб

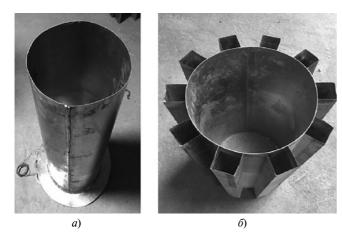


Рис. 2. Внутренный слой трубы (a) и общий вид части трубы с внутренним слоем, соединенным с гофрированным заполнителем (б)

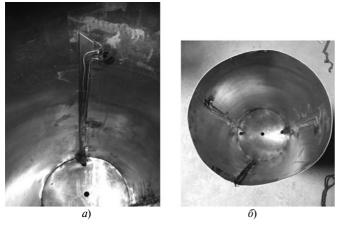


Рис. 3. Внутренний (a) и внешний (б) слои трубы с приклеенными тензорезистерами

быть такими, чтобы она оставалась трехслойной, число образцов для экспериментальных исследований должно быть ограничено. Многолетние исследования трехслойных конструкций, проводимые на кафедре СК И ГТС ДГТУ, показали, что выборка должна состоять не менее чем из восьми образцов для каждой серии испытаний.

Методика проведения исследований

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы трехслойных труб различного диаметра (см. рис. 1).

В качестве материала для изготовления заполнителя (гофра) ТТ использовали сплав алюминия Д16—АТ; толщина гофра составляла 0,24 мм, высота — 50 мм. Несущие слои образцов были выполнены из сплава алюминия АМГ2-Н толщиной 1.0 мм.

Изготовили шесть серий образцов. Каждая серия включала в себя восемь одинаковых ТТ. Образцы были собраны на клее ЭД-20.

Серии образцов отличались между собой диаметром трехслойных труб.

Этапы сборки трехслойных труб показаны на рис. 2÷4.

Конструкция трехслойной трубы была разбита на две отдельные секции. Первая была ограничена длиной и внутренним радиусом (рис. 2, a). Вторая секция располагалась между внутренним и внешним слоями. При испытаниях давление создавалось в первом отсеке (рис. 5, a) или во втором (рис. 5, a), а при необходимости в обоих отсеках (рис. 5, a).

Трубы были испытаны на экспериментальной установке (рис. 6), которая позволяет испытывать элемент трехслойной трубы на воздействие внутреннего давления в разных вариантах. Нагрузку на образец создавали с помощью воздуха, нагнетаемо-

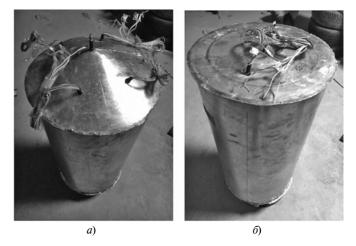


Рис. 4. Виды на верхнюю (a) и нижнюю (δ) торцевые части трехслойного трубчатого элемента

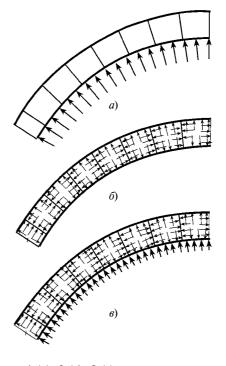


Рис. 5. Схемы 1 (а), 2 (б), 3 (в) нагружения трехслойной трубы

го в трехслойные трубы компрессором и измеряли манометром типа ОБМ-1.

Для измерения напряжений и деформаций в трехслойных трубчатых элементах использовали измерительный комплекс (рис. 7).

Для определения напряжений и деформаций применяли тензорезисторы с базой 1 см, которые приклеивали к элементам испытуемого образца: к стенкам заполнителя и к обшивкам трубы.

Как известно, для определения НДС с помощью тензорезисторов необходимо знать их характеристики, такие как коэффициент тензочувствительности.

Для определения тензочувствительности использовали тензостанцию ZET 017-T8.

Были испытаны следующие серии образцов: 1- с диметрами внешнего слоя $D_1=420$ мм, внутреннего $D_2=370$ мм; 2- с диметрами $D_1=600$ мм, $D_2=550$ мм; 3- с диметрами $D_1=800$ мм, $D_2=750$ мм; 4- с диметрами $D_1=1000$ мм,



Рис. 6. Общий вид установки для испытания ТТ

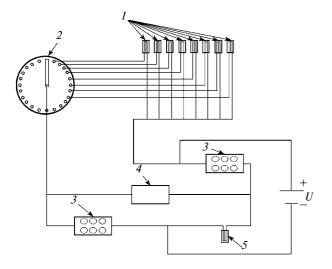


Рис. 7. Схема измерительного комплекса:

1 — измерительные тензорезисторы; 2 — многопозиционный переключатель; 3 — магазины сопротивлений; 4 — тензостанция; 5 — компенсационный тензорезистор

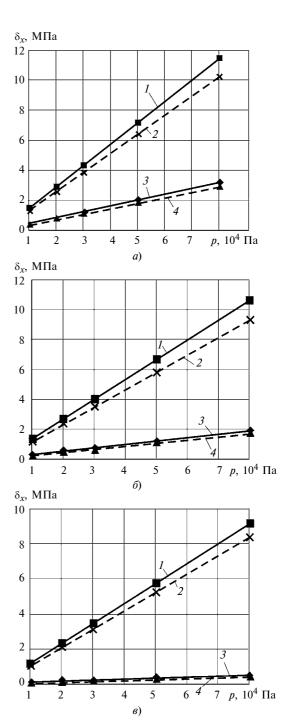


Рис. 8. Зависимости напряжений σ_x в нижнем (a), среднем (б) и верхнем (в) несущих слоях в трубах диаметром 1000 мм (1— экспериментальные, 2— расчетные) и диаметром 420 мм (3— экспериментальные, 4— расчетные) от внутреннего давления p

 $D_2 = 950$ мм; 5 — с диметрами $D_1 = 1200$ мм, $D_2 = 1150$ мм; 6 — с диметрами $D_1 = 1400$ мм, $D_2 = 1350$ мм. Результаты испытаний, после их обработки, приведены в табл. 1 и 2, а также показаны на рис. 8, a-e в виде зависимостей только σ x(p) и только для трехслойных труб диаметрами 420 и 1000 мм (в силу ограниченности объема статьи).

Результаты экспериментальных исследований сравнивали с результатами расчетов, проведенных авторами ранее (приведены в работе [11]).

Таблица 1

Сравнение экспериментальных и расчетных параметров трехслойных труб диаметром 420 мм

			σ_x , 1	0 ⁴ ПА,	, в нес	σ_{x} , 10 ⁴ ПА, в несущем слое	элое					σ_y , 10^4	¹ ПА, і	в несу	о _у , 10⁴ ПА, в несущем слое	лое					σ _{xy} , 1($\sigma_{\chi y}, 10^4$ ПА, в несущем слое	в несу	щем с	лое		
$p, 10^4 \Pi a$		нижнем	M		среднем	М	В	верхнем	Ā	H	нижнем		cb	среднем		Beľ	верхнем		НИ	нижнем		cb	среднем		B	верхнем	
	Œ	Ь	P Δ, %	Э	Ь	Δ, %	Э	Т	Δ, %	Ð	Ь	P \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	Э	P	P \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	Ð	P Δ, %	%, "	Э	Р Δ, %	Δ, %	Э	Ь	P Δ, %	Э	Р	Δ, %
1	39,2	35,9	9,34	23,1	20,52	12,45	5,86	5,14	14,05	4,62	4,17	10,8	1,36	1,20	1,20 13,16 7,18	7,18	6,58	9,27 0,	0,0035 0,0032	,0032	12,16	12,16 0,0046 0,0040 14,52 0,0048	0,0040	14,52	0,0048	0,0040	18,2
2	78,5	78,5 71,8	9,34		41,04	46,1 41,04 12,45	11,72	11,72 10.28	14,05	9,24	8,34	8,01	2,72	2,41	13,16 1	4,37	3,16	0,27	2,41 13,16 14,37 13,16 9,27 0,0071 0,0064 12,16 0,0093 0,0081 14,52 0,0096	,0064	12,16	0,0093	0,0081	14,52		0,008	18,2
8	117,7	107,7	9,34	69,2	61,56	61,56 12,45	17,58	17,58 15,42 14,05	14,05	13,86 12,51	12,51	10,8	4,09	3,61	3,61 13,16 21,56 19,74	1,56	9,74	9,27 0,	0,0107	0,0096	12,16	0.0139 0,0122 14,52 0,0144	0,0122	14,52		0,0122	18,2
S	196,2	196,2 179,5	9,34	115,3	102,6	115,3 102,6 12,45 29,31 25,70	29,31		14,05	23,10	20,85	10,8	6,81	6,02	6,02 13,16 35,94 32,90	5,94		9,27 0,	0,0179	0,016	12,16	12,16 0,0233 0,0203	0,0203	14,52 0,0240		0,0203	18,2
∞	314,0	287,2	314,0 287,2 9,34 184,6 164,16 12,45 46,89 41,12 14,05	184,6	164,16	12,45	46,89	41,12	16	36,96	33,36	10,8	10,90	9,64	36,96 33,36 10,8 10,90 9,64 13,16 57,51 52,64 9,27 0,0287	5 12,71	2,64	,27 0.	0 287 0	0,0256 12,16 0,0372 0,0325 14,52 0,0384	12,16	0,0372	0,0325	14,52	0,0384	0,0325	18,2

 Π р и м е ч а н и е. \Im — экспериментальные данные; Р — результаты расчета; Δ — расхождение \Im и Р.

Сравнение экспериментальных и расчетных параметров трехслойных труб диаметром 1000 мм

Таблица 2

						•	•	•			•		•	•	•		•											
			σ _x , 10	σ_{x} 10 ⁴ Па в несущем слое	несуп	цем сл	oe					$\sigma_{y}, 10^{4} \Pi a \mathrm{B} \mathrm{HecyllleM} \mathrm{cnoe}$	4 Па в	несуп	цем сл	0e					σ_{xy}	$\sigma_{\chi y}$, 10 ⁴ Па в несущем слое	в несу	лцем с	лое			
р, 10 ⁴ Па	НИ	нижнем	1	ъ́	среднем	ı	Beľ	верхнем		HI	нижнем		сb	среднем		Bel	верхнем		ни	нижнем		cb	среднем		Be	верхнем		
	Э	Ь	P \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	Э	Ь	P \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	Œ	P \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	3, %	Φ	P ^	Δ, %	Ð	P ^	Δ, %	Ð	P A	Δ, %	Ð	P \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \ \	1, %	Ð	Ь	Δ, %	Ð	Ь	Δ, %	
1	142,34	127		12,08 132,2 115,5 14,45 114,02 104	115,5	14,45	114,02	104	9,64	26,1	23,1 1	13,22	22,6	1,61	18,4	17,2	15,1	(4,01	14,01 0,0013 0,001	1,000,0	11,73	11,73 0,0011 0,0009 13,16	0,000,0	13,16	0,0004	0,0003	9,93	
2	284,68	254	12,08	254 12,08 264,4 231,0 14,45 228,05 208	231,0	14,45	228,05	208	9,64	52,3	46,2	13,22	45,2	38,2	18,4	34,4	30,2	(4,01	14,01 0,0027 0,002 11,73 0,0021 0,0019 13,16 0,0008	0,002	(1,73),0021	9,0019	13,16		0,0007	9,93	
3	427,02	381	12,08		346,5	14,45	396,5 346,5 14,45 342,07 312	312	9,64	78,4	69,3	13,22 (6	8,79	57,3	18,4	51,6	45,3	14,01 0,0041),0041	0,003	11,73	0,003 11,73 0,0032 0,0029 13,16	0,0029	13,16	0,0012	0,0011	9,93	
5	711,70	635	12,08	12,08 660,9 577,5 14,45 570,13 520 9,64	577,5	14,45	570,13	520		130,7	115,5	13,22	113,0	95,5	18,4	0,98	75,5	(4,01	14,01 0,0068 0,006 11,73 0,0054 0,0048 13,16 0,0020	0,006	(1,73),0054 (0,0048	13,16	0,0020	0,0018	9,93	
∞	1138,73	1016	12,08	1016 12,08 1057,5 924,0 14,45 912,20 832	924,0	14,45	912,20	832	9,64 2	209,2	184,8	13,22	180,9	152,8	18,4	137,7	20,8	(4,01	137,7 120,8 14,01 0,0109 0,009 11,73 0,0087 0,0077 13,16 0,0032),009 1	(1,73),0087	7,0077	13,16		0,0029	9,93	

Примечание. Э — экспериментальные данные; Р — результаты расчета; ∆ — расхождение Э и Р.

М. М. СТЕБУЛЯНИН, д-р техн. наук, А. В. МАЛЯРЕНКО (МГТУ "СТАНКИН"), e-mail: mmsteb@rambler.ru

Метод стабилизации скорости интервальных мехатронных систем

Рассматривается метод настройки регуляторов динамических квадратичных систем с взаимовлиянием переменных состояния в режиме торможения кинематических возмущений относительно опорной (программной) траектории движения в условиях интервальной неопределенности параметров. В основу положена декомпозиция исходной системы и прямой метод Ляпунова.

Ключевые слова: динамическая квадратичная система, настройка, регулятор, траектория, движение, неопределенность параметров, метод Ляпунова.

The method of tuning of regulators of dynamic quadratic systems with the interaction of state variables in the deceleration mode of kinematic perturbations relative to the reference (program) motion trajectory under the conditions of interval uncertainty of parameters is considered. The basis is the decomposition of the original system and the direct Lyapunov method.

Keywords: mechatronic system, stabilization, stability, Lyapunov function.

Мехатронные системы относятся к классу управляемых многосвязных динамических систем с мультипликативными нелинейностями обобщен-

ных скоростей и зачастую с тригонометрическими нелинейностями обобщенных координат движения. В настоящее время общих критериев синтеза данных систем пока не существует. Среди частных критериев распространен критерий качества удержания (стабилизации) программной траектории движения системы. Решение задачи стабилизации весьма сложное даже в отсутствие постоянно действующих возмущений. И несмотря на то, что этому вопросу посвящено множество работ [1—17], задача продолжает оставаться актуальной, особенно с учетом требований "инженерности" решения, т. е. достаточно простые реализуемые процедуры его поиска, не требующие алгоритмов специальной математической обработки информации.

В настоящей работе рассматривается метод, удовлетворяющий данному требованию при решении задачи стабилизации программной скорости движения лагранжевой системы с параметрическими неопределенностями. Метод предполагает достижение асимптотической устойчивости "в малом" системы по скорости и устойчивости по положению по Ляпунову, т. е. может квалифицироваться как метод решения задачи торможения кинематических возмущений в интервальных квадратичных системах.

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 20)

Выводы

Сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными, показало, что расхождение между ними составляет $10 \div 19~\%$. Это свидетельствует о правильности выбранной расчетной схемы трехслойной трубы и корректности проведенных экспериментальных исследований.

В целом результаты расчетов показали возможность применения трехслойных труб для транспортировки различных сред.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Арочные** трубопроводы. Горная энциклопедия / Под ред. Е. А. Козловского, М.: Советская энциклопедия, 1984—1991.
- 2. **Висячие** трубопроводы. Горная энциклопедия / Под ред. Е. А. Козловского. М.: Советская энциклопедия, 1984—1991.
- 3. **Подземный** трубопровод. Горная энциклопедия / Под ред. Е. А. Козловского. М.: Советская энциклопедия, 1984—1991.
- 4. **Подводный** трубопровод. Горная энциклопедия / Под ред. Е. А. Козловского. М.: Советская энциклопедия, 1984—1991.

- 5. **Петров И. П., Спиридонов В. В.** Надземная прокладка трубопроводов. М.: Недра, 1965. Гл. 5. Системы, применяемые при надземной прокладке трубопроводов. § 1. Обзор построенных балочных систем надземных трубопроводов. С. 97—117.
- 6. Лессинг Е. Н., Лилеев А. Ф., Соколов А. Г. Листовые металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1970. Гл. 9. Трубопроводы большого диаметра. § Общие положения. С. 224, 225.
- 7. **Надземный** трубопровод. Горная энциклопедия / Под ред. Е. А. Козловского. М.: Советская энциклопедия, 1984—1991.
- 8. **Монтаж трубопроводов.** Справочник рабочего. Гл. 1. Общие сведения о трубопроводах. § 1. Назначение и классификация / А. А. Персион, К. А. Гарус. Киев: Будивельник, 1987. С. 5—10.
- 9. **СП 36.13330.2012.** Магистральные трубопроводы. П. 3. Термины и определения.
- 10. **Казакевич М. И., Любин А. Е.** Проектирование металлических конструкций надземных промышленных трубопроводов. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Будивельник, 1989. 160 с. Раздел первый. Гл. І. Общие сведения. Унификация. С. 5—9.
- 11. **Расчет** трехслойных труб большого диаметра на ПК Лира / О. М. Устарханов, А. И. Булгаков, Х. М. Муселемов, Р. И. Вишталов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. Т. 45. 2018. № 2. С. 192—200.

Теоретическая основа метода

Рассмотрим систему обыкновенных дифференциальных уравнений вида

$$\begin{cases} \dot{y} = \varepsilon; \\ \dot{\varepsilon}_{i} = \varepsilon^{T} A_{i} \varepsilon + L_{i}^{T} \varepsilon + P_{i}(y, \varepsilon), i = 1, ..., n, \end{cases}$$
 (1)

где $A_i = A_i^T \in R^{n \times n}, \ L_i \in R^n$ — параметры; $\gamma, \ \epsilon \in R^n$ — переменные.

Данная система описывает возмущенное движение многих робототехнических систем.

Пусть для каждой матрицы A_i известны только диагональные элементы, а остальные элементы вместе с элементами каждого вектора L_i заданы иисловыми интервалами. Величины $P_i(y,\varepsilon)$ — полиномы переменных не выше третьей степени. Совокупность $P_{1,2,3}(y,\varepsilon)$ назовем стабилизатором. Ставится задача: найти стабилизатор системы (1) из условия асимптотической устойчивости "в малом" ее тривиального решения в части переменного ε .

Назовем систему, получающуюся при "замораживании" переменной $\varepsilon_k=0$, k-частной первого порядка системой (1). Такая система запишется в виде:

$$\begin{cases} y_k = \text{const}; \\ \dot{y}_i = \varepsilon_i; \\ \dot{\varepsilon}_i = \varepsilon_k^T A_i^{(k)} \varepsilon_k + L_i^{(k)} \varepsilon_k^T + P_{ki}, \\ i = 1, 2, ..., k-1, k+1, ..., n, \end{cases}$$
(2)

где $\varepsilon_k = \mathrm{colon}(\varepsilon_i); \ P_i^{(k)} = P_i(\gamma, \varepsilon)_{\varepsilon_k = 0} = P_i(\gamma, \varepsilon_k);$ $A_i^{(k)}$ — матрица, получаемая из A_i вычеркиванием k-столбца и k-строки; $L_i^{(k)}$ — вектор, получаемый из L_i вычеркиванием k-го элемента.

Рассмотрим сферическую функцию Ляпунова $V(\varepsilon) = \|\varepsilon\|^2$, которая является мерой отклонения от нуля переменного ε .

Справедлива следующая теорема.

Пусть для каждой k-частной системы (2), $k=\overline{1,n}$, функция $V_k(\varepsilon_k)=\sum\limits_{i\neq k}\varepsilon_i^2=\|\varepsilon_k\|^2$ имеет отрицательно определенную производную в области $N_k(\varepsilon)\colon \|\varepsilon_k\|^2 < R^2$ при следующем законе стабилизатора:

$$P_{s} = -\sum_{i \neq s} (p_{s} \varepsilon_{s} + A_{ii}^{(s)}) \varepsilon_{i}^{2} - q_{s} \varepsilon_{s}; \quad s = \overline{1, n}, \quad (3)$$

где $A_{ii}^{(s)}$ — диагональные элементы матрицы A_s .

Тогда существуют такие $p_s^* < \infty$, $q_s^* < \infty$, что в законе (3) при каждых $p_s > p_s^*$ и $q_s > q_s^*$ справедлива асимптотическая устойчивость тривиального решения системы (1) в $N(\varepsilon)$: $\|\varepsilon\|^2 < R^2$.

Доказательство.

Форма V характеризует систему (1), а V_k — систему (2). Эти системы описывают разные динамические процессы так, что $\varepsilon_k(t)$ не является "частью" решения $\varepsilon(t)$. Однако при этом справедливы одинаковые зависимости от переменного ε функций $V_k(\varepsilon_k)$ и $V(\varepsilon)_{\varepsilon_k=0}$. Этот факт будет отражаться

записью $V_k(\varepsilon_k) \overset{f}{\longleftrightarrow} V(\varepsilon)_{\varepsilon_k=0}$. При этом, конечно, нельзя писать, что $V_k(t) \overset{f}{\longleftrightarrow} V(t)_{\varepsilon_k=0}$, и тем более, что $V_k(t) \equiv V(t)_{\varepsilon_k=0}$.

Выполняется следующее:

$$\frac{\partial V_k}{\partial \varepsilon_s} \stackrel{f}{\leftrightarrow} \frac{\partial V}{\partial \varepsilon_s} - 2\varepsilon_k. \tag{4}$$

Запишем выражение полной производной по времени функции V_k :

$$\dot{V}_k = \sum_{s \neq k} \frac{\partial V_k}{\partial \varepsilon_s} \dot{\varepsilon}_{ks} = 2 \sum_{s \neq k} \varepsilon_s \dot{\varepsilon}_{ks}, \tag{5}$$

где $\dot{\epsilon}_{ks}$ — производные переменных состояния системы в процессе, описываемом уравнениями (2).

Из сравнения выражений (1) и (2) видно:

$$\dot{\varepsilon}_{ks} \stackrel{f}{\leftrightarrow} \dot{\varepsilon}_{s} - 2 \sum_{i \neq k} A_{ik}^{(s)} \varepsilon_{i} \varepsilon_{k} - A_{kk}^{(s)} \varepsilon_{k}^{2} - I_{k}^{(s)} \varepsilon_{k} - P_{s}^{(k)},$$
(6)

где $l_k - k$ -й коэффициент вектора $L_s; P_s^{(k)} \stackrel{f}{\leftrightarrow} P_s - P_{ks}, s \neq k$.

Подставив выражение (6) в формулу (5), получим:

$$\frac{1}{2}\dot{V}_{k} \stackrel{f}{\longleftrightarrow} \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} \dot{\varepsilon}_{s} - 2\varepsilon_{k} \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} \sum_{i \neq k} A_{ik}^{(s)} \varepsilon_{i} - \varepsilon_{k}^{2} \sum_{s \neq k} A_{kk}^{(s)} \varepsilon_{s} - I_{k}^{(s)} \varepsilon_{k} \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} - \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} P_{s}^{(k)} = \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} \dot{\varepsilon}_{s} - \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} (G_{sk} + P_{s}^{(k)}), \tag{7}$$

где
$$G_{sk} = \varepsilon_k \left(2 \sum_{s \neq k} A_{ik}^{(s)} \, \varepsilon_i + A_{kk}^{(s)} \, \varepsilon_k + I_k^{(s)} \right) = \varepsilon_k \, \tilde{G}_{sk} \, .$$

Прибавим к левой и правой частям выражения (7) функцию $\frac{1}{2} \frac{\partial V}{\partial \varepsilon_L} \varepsilon_k$, получим:

$$\frac{1}{2}\dot{V}_{k} + \frac{1}{2}\frac{\partial V}{\partial \varepsilon_{k}}\varepsilon_{k} \stackrel{f}{\leftrightarrow} \frac{\dot{V}}{2} - \sum_{s \neq k}\varepsilon_{s}(G_{sk} + P_{s}^{(k)}). \quad (8)$$

Просуммируем выражение (8) по k, учитывая, что выполняется $P_s^{(k)} = -p_s \varepsilon_s \varepsilon_k^2 - A_{kk}^{(s)} \varepsilon_k^2$, получим:

$$\frac{1}{2} \sum_{k} \dot{V}_{k} \stackrel{f}{\leftrightarrow} \frac{1}{2} (n-1) \dot{V} + \sum_{k} \vartheta_{k}.$$

Здесь
$$\Theta_k = \varepsilon_k^2 \sum_{s \neq k} p_s \varepsilon_s^2 - \varepsilon_k \sum_{s \neq k} \varepsilon_s \tilde{G}_{sk}^*$$
; $\tilde{G}_{sk}^* - A_{kk}^{(s)} \varepsilon_k =$

$$= 2 \sum_{i \neq k} A_{ik}^{(s)} \varepsilon_i + I_k^{(s)} < 2R\sigma_{sk} + I_k^{(s)} = \sigma_{sk}^*$$
, где σ_{sk} —

верхняя оценка интервальной суммы $\sum_{i \neq k} A_{ik}^{(s)}$.

Запишем выражение для \dot{V}_k при некотором k:

$$\frac{1}{2}\dot{V}_{k} = \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} \left(\varepsilon_{k}^{T} A_{s}^{(k)} \varepsilon_{k} - \sum_{r \neq s, k} A_{rr}^{(s)} \varepsilon_{r}^{2} \right) +$$

$$+ \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} L_{s}^{(k)} \varepsilon_{k}^{T} - \sum_{s \neq k} \left(p_{s} \varepsilon_{s}^{2} \sum_{r \neq s, k} \varepsilon_{r}^{2} + q_{s} \varepsilon_{s}^{2} \right),$$

оценим знак величины $\Psi(\varepsilon) = \frac{1}{2} \sum_k \dot{V}_k - \sum_k \vartheta_k$.

Для этого рассмотрим в $N(\varepsilon)$ две функции:

$$\varphi(\varepsilon_k) = \sum_{s \neq k} \varepsilon_s \left(\varepsilon_k^T A_s^{(k)} \varepsilon_k - \sum_{r \neq s, k} A_{rr}^{(s)} \varepsilon_r^2 \right) + \sum_{s \neq k} \varepsilon_s L_s^{(k)} \varepsilon_k;$$

$$g(\varepsilon_k) = \sum_{s \neq k} \left(\varepsilon_s^2 \sum_{r \neq s, k} \varepsilon_r^2 + \varepsilon_s^2 \right).$$

Нетрудно получить для них следующие оценки:

$$\varphi(\varepsilon_k) \le (L^* + \infty \max^k \sqrt{n-1} R) \|\varepsilon_k\|^2, \quad g(\varepsilon_k) > \|\varepsilon_k\|^2,$$

где L^* — максимальный модуль элемента матрицы, составленной из строк L_i^T , $i=\overline{1,n}$; ∞_{\max}^k — оценка собственных чисел ∞_s^k матриц $A_s^{(k)}$:

Тогда, выбирая $\eta_k = \theta_k + L^* + \infty \max_{\max}^k \sqrt{n-1} \ R$, получим неравенство:

$$\begin{split} & \sum_k \left(\eta_k g(\epsilon_k) - \phi(\epsilon_k) \right) > \sum_k \theta_k \|\epsilon_k\|^2 \geq \theta_{\min}(n-1) \|\epsilon\|^2, \\ \text{где } & \theta_{\min} = \min_k \theta_k. \end{split}$$

Далее заметим, что

$$\sum_{k} \varepsilon_{k} \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} \tilde{G}_{sk}^{*} \leq \sum_{k} |\varepsilon_{k}| \sum_{s \neq k} |\varepsilon_{s}| \sigma_{sk}^{*} \leq \sigma_{\max} \sum_{k} |\varepsilon_{k}| \sum_{s \neq k} |\varepsilon_{s}|.$$

Положив $\theta_{min} > \sigma_{max}$, получим:

$$\sum_{k} (\eta_{k} g(\varepsilon_{k}) - \varphi(\varepsilon_{k})) - \sum_{k} \varepsilon_{k} \sum_{s \neq k} \varepsilon_{s} \tilde{G}_{sk}^{*} >$$

$$> \sigma_{\max} \left[(n-1) \|\varepsilon\|^{2} - \sum_{k} |\varepsilon_{k}| \sum_{s \neq k} |\varepsilon_{s}| \right] =$$

$$= \sigma_{\max} \sum_{i,j} (\varepsilon_{i} - \varepsilon_{j})^{2} \ge 0.$$
(9)

Так как $\Psi(\varepsilon) \leq \sum_k (\varphi(\varepsilon_k) - \eta_k g(\varepsilon_k)) + \sum_k \varepsilon_k \sum_{s \neq k} \varepsilon_s \tilde{G}_{sk}^*$, то из выражения (9) следует $\Psi(\varepsilon) < 0$ при любом $\varepsilon \in N(\varepsilon)$, если принять в формуле (3) $p_s, q_s > \max_k \eta_k$.

Так как $\Psi(\varepsilon) \stackrel{f}{\leftrightarrow} \frac{1}{2}(n-1)\dot{V}$, то обеспечивается от-

рицательная определенность производной функции Ляпунова $V(\varepsilon)$. Поскольку $V(\varepsilon)$ допускает бесконечно малый высший предел при $\|\varepsilon\| \to 0$, получим асимптотическую устойчивость тривиального решения системы (1) в $N(\varepsilon)$.

Сделаем обобщение. Для функций $F_k(x_1, ..., x_{k-1}, x_{k+1}, ..., x_n)$, k=1, ..., n функцию $F(x_1, ..., x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, ..., x_n)$ назовем охватывающей, если для каждого k выполняется

$$F_k(x_1, ..., x_{k-1}, x_{k+1}, ..., x_n) \stackrel{f}{\leftrightarrow} F(x_1, ..., x_{k-1}, x_k, x_{k+1}, ..., x_n).$$

Аналогично понятию k-частной системы введем в общем случае понятие $(k_1, ..., k_h)$ -частной системы, $k_1 < ... < k_h$, получающейся "замораживанием" координат $\varepsilon_{k_1} = ... = \varepsilon_{k_h} = 0$ в уравнениях (1). Ее будем называть частной h-порядка системой (1).

В силу подобия k-частной и исходной систем уравнения каждой частной системы h-порядка имеют функционально аналогичный системе (1) вид (ниже обозначена перестановка $\{k_1, ..., k_h\} = \{h\}$):

$$\begin{cases} \gamma_{k_{1}} = \text{const}, ..., \gamma_{k_{h}} = \text{const}; \\ \dot{\gamma}_{i} = \varepsilon_{i}, i \notin \{h\}; \\ \dot{\varepsilon}_{i} = \varepsilon_{\{\tilde{h}\}}^{T} A_{i}^{\{h\}} \varepsilon_{\{\tilde{h}\}} + L_{i}^{\{h\}} \varepsilon_{\{\tilde{h}\}}^{T} + P_{i}^{\{h\}}, \end{cases}$$
(10)

где $\varepsilon_{\{\tilde{h}\}}$ — вектор переменных с номерами, составляющими перестановку $\{\tilde{h}\}=\{1,\ 2,\ ...,\ n\}-\{h\};$ $A_i^{\{h\}}$ — матрица, получающаяся из A_i вычеркиванием строк и столбцов с номерами $k_1,\ ...,\ k_h;\ L_i^{\{h\}}$ — вектор, получающийся из L_i вычеркиванием элементов с номерами $k_1,\ ...,\ k_h;\ P_i^{\{h\}}\ \stackrel{f}{\leftrightarrow}\ P_i(\varepsilon_{\{h\}}=0);$

 $\varepsilon_{\{h\}}$ — вектор переменных с номерами, составляющими перестановку $\{h\}$.

Но тогда, рассматривая для частных систем h и (h+1) порядков формы: $V_{\{h\}}=V(\varepsilon_{\{h\}}=0)$, $V_{\{h+1\}}=V(\varepsilon_{\{h\}}=0,\ \varepsilon_{h+1}=0)$ в виде: $V_{\{h+1\}}=V_{\{h\}}(\varepsilon_{h+1}=0)$, т. е. рассматривая $\{h+1\}$ -частную систему, как k_{h+1} — частную систему первого порядка от $\{h\}$ -частной системы (1), можно распространить утверждение данной теоремы на случай частных систем h-го и (h+1)-го порядков.

Допустим, что для частных систем (1) порядка

n-2, представляющих собой всевозможные двусвязные системы, которые можно вычленить в составе исходной — связной системы, существуют функции Ляпунова: $V_i^{(n-2)}(\varepsilon_{i1}, \varepsilon_{i2}) = \varepsilon_{i1}^2 + \varepsilon_{i2}^2$; $i=1,..., C_n^2$. Тот факт, что стабилизатор (3) с "усечением" до двух переменных позволяет получить отрицательную определенность производной сферической функции Ляпунова для двусвязной модели, установлен в работе [18].

Тогда из доказанной теоремы следует существование охватывающих функций Ляпунова вида

$$V_j^{(n-3)}(\varepsilon_{j1}, \, \varepsilon_{j2}, \, \varepsilon_{j3}) = \varepsilon_{j1}^2 + \varepsilon_{j2}^2 + \varepsilon_{j3}^2,$$

 $j = 1, \, ..., \, C_n^3$

для каждой тройки номеров j_1, j_2, j_3 , которые индексируют всевозможные трехсвязные системы, и т. д. по индукции. При этом векторные параметры p, q, полученные на предыдущем уровне связности, играют роль входных параметров p^*, q^* для последующего уровня.

В итоге получим выполнение теоремы для исходной системы (1).

Таким образом, настройку стабилизатора многосвязной квадратичной системы можно провести в различных комбинируемых двусвязных системах, "вложенных" в нее.

Рассмотрим пример, показывающий действенность данного подхода.

Пример стабилизируемой системы

Рассматривается мехатронная система, состоящая из трех звеньев согласно рис. 1, на котором показаны также обобщенные координаты q_1 , q_2 и q_3 .

Дифференциальные уравнения движения данной системы опишем уравнениями Лагранжа второго рода:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_{j}} - \frac{\partial T}{\dot{q}_{j}} + \frac{\partial \Pi}{\dot{q}_{j}} = Q_{j}, \quad j = 1, ..., n, \tag{11}$$

где n — число обобщенных координат; T — кинетическая энергия системы; Π — потенциальная

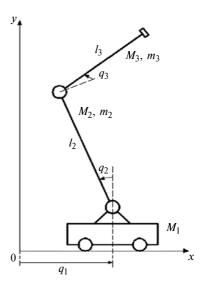


Рис. 1. Пример мехатронной системы

энергия системы; Q_j — обобщенная сила; q_j — обобщенная координата.

Введем обозначения: M_1 — масса тележки; m_2 — масса привода плеча манипулятора; M_2 — масса плеча манипулятора; m_3 — масса привода кисти манипулятора; M_3 — масса кисти манипулятора; l_2 — длина плеча манипулятора; l_3 — длина кисти манипулятора; Θ_2 , Θ_3 — моменты инерции соответственно плеча и кисти манипулятора.

Получим уравнения динамики данного трехзвеника:

$$\ddot{q}_{2} - (m_{3}/2 + M_{3})l_{3}\sin(q_{2} + q_{3})\ddot{q}_{3} = -(m_{2}/2 + M_{2} + m_{3} + M_{3})l_{2}\sin q_{2}\dot{q}_{2}^{2} + (m_{3}/2 + M_{3})l_{3}\cos(q_{2} + q_{3}) \times \\ \times (\dot{q}_{2} + \dot{q}_{3})^{2} + Q_{1} - ((m_{2}/2 + M_{2} + m_{3} + m_{3})l_{2}\cos q_{2} + (m_{3}/2 + M_{3})l_{3}\sin(q_{2} + q_{3}))\ddot{q}_{1} + \\ + (m_{3}/2 + M_{3})l_{2}^{2} + (m_{3} + 2M_{3})l_{2}l_{3}\sin q_{3} + \\ + \Theta_{2} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}l_{3}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{3} = \\ = -(m_{2}/2 + M_{2} + m_{3} + M_{3})l_{2}\sin q_{2}\dot{q}_{1}\dot{q}_{2} - (m_{3} + 2M_{3})l_{2}l_{3}\cos q_{3}\dot{q}_{2}\dot{q}_{3} + \\ + (m_{3}/2 + M_{3})l_{3}\cos(q_{2} + q_{3})(\dot{q}_{1}\dot{q}_{2} + \dot{q}_{1}\dot{q}_{3}) - \\ - (m_{2}/2 + M_{2})l_{2}\cos q_{2}\dot{q}_{1} + \Theta_{2}\dot{q}_{2} + (m_{3} + M_{3}) \times \\ \times (l_{2}^{2}\dot{q}_{2} - l_{2}\cos q_{2}\dot{q}_{1}) + (m_{3}/2 + M_{3})l_{3}(2l_{2}\sin q_{3}\dot{q}_{2} + \\ + l_{2}\sin q_{3}\dot{q}_{3} - \sin(q_{2} + q_{3})\dot{q}_{1}) + \Theta_{3}\dot{q}_{2} + \Theta_{3}\dot{q}_{3} + \\ + (m_{2}/2 + M_{2} + m_{3} + M_{3})gl_{2}\sin q_{2} - \\ - (m_{3}/2 + M_{3})gl_{3}\cos(q_{2} + q_{3}) + Q_{2}; \qquad (12) \\ - (m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{2}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{2} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{3}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{3} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{3}\sin q_{3} + \Theta_{3})\ddot{q}_{3} + \Theta_{3}\ddot{q}_{3} = \\ + ((m_{3}/2 + M_{3})l_{3}\sin q_{3$$

$$= -(m_3/2 + M_3)l_2l_3\cos q_3\dot{q}_2\dot{q}_3 + (m_3/2 + M_3)l_3 \times \\ \times \cos(q_2 + q_3)(\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_1\dot{q}_3) + (m_3/2 + M_3) \times \\ \times l_3(l_2\sin q_3\dot{q}_2 - \sin(q_2 + q_3)\dot{q}_1) + \Theta_3\dot{q}_2 + \\ + \Theta_3\dot{q}_3 - (m_3/2 + M_3)gl_3\cos(q_2 + q_3) + Q_3.$$

Принимаем следующие значения длин и масс звеньев: $M_1=3$ кг, $M_2=2$ кг, $M_3=0.6$ кг, $m_2=1$ кг, $m_3=0.8$ кг, $l_2=0.5$ м, $l_3=0.4$ м, и рассмотрим режим динамического позиционирования относительно положения $q_1=0.25$ м, $q_2=-45^\circ$ и $q_3=45^\circ$.

Введем обозначения $\Delta q_j = \gamma_j$ и $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\Delta q_j) = \varepsilon_j$, получим для возмущенного движения в виде (1) следующие конкретные численные величины A_j и L_j :

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0.1728 & -0.082 \\ 0.1728 & 0.3622 & 0.0844 \\ -0.082 & 0.0844 & 0.0295 \end{bmatrix};$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0.9332 & -0.44 \\ 0.9332 & 0.6583 & 0.1624 \\ -0.44 & 0.1624 & -0.1332 \end{bmatrix};$$

$$A_{3} = \begin{bmatrix} 0 & -0,4003 & 2,4834 \\ -0,4003 & -1,3848 & -0,7347 \\ 2,4834 & -0,7347 & 0,279 \end{bmatrix};$$

$$L_{1} = \begin{bmatrix} -0,5095 & 0,2807 & 0,0002 \end{bmatrix};$$

$$L_{2} = \begin{bmatrix} -2,7444 & 1,5155 & 0 \end{bmatrix};$$

$$L_{3} = \begin{bmatrix} 5,7674 & -1,0866 & 0,998 \end{bmatrix}.$$

Законы регуляторов при этом в соответствии с выражением (3) имеют вид:

$$P_{1} = -(p_{1}\varepsilon_{1} + 0.3622)\varepsilon_{2}^{2} - (p_{1}\varepsilon_{1} + 0.0295\varepsilon_{3}^{2}) - k_{1}\varepsilon_{1};$$

$$-k_{1}\varepsilon_{1};$$

$$P_{2} = -(p_{2}\varepsilon_{2} + 0)\varepsilon_{1}^{2} - (p_{2}\varepsilon_{2} - 0.1332)\varepsilon_{3}^{2} - k_{2}\varepsilon_{2};$$

$$P_{3} = -(p_{3}\varepsilon_{3} + 0)\varepsilon_{1}^{2} - (p_{3}\varepsilon_{3} - 1.3848)\varepsilon_{2}^{2} - k_{3}\varepsilon_{3}.$$

$$(13)$$

Уравнения *j*-частных систем:

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_1 = -0.5095\varepsilon_1 + 0.2807\varepsilon_2 + 0.3456\varepsilon_1\varepsilon_2 + \\ + 0.3622\varepsilon_2^2 + P_1; \\ \dot{\varepsilon}_2 = -2.7444\varepsilon_1 + 1.5155\varepsilon_2 + 1.8664\varepsilon_1\varepsilon_2 + \\ + 0.6583\varepsilon_2^2 + P_2; \end{cases} j = 3;$$

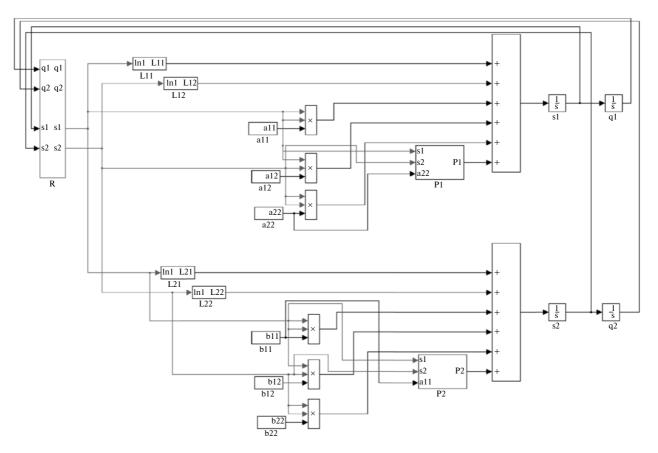


Рис. 2. Модель единого модуля с регуляторами в Simulink Matlab

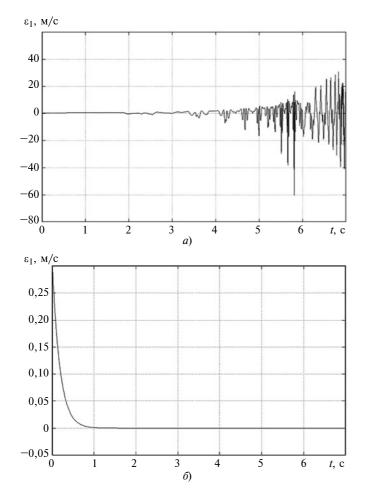


Рис. 3. Графики скорости ε_1 звена 1 системы без стабилизации (a) и со стабилизацией (б)

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_{1} = -0.5095\varepsilon_{1} - 0.0002\varepsilon_{3} - 0.164\varepsilon_{1}\varepsilon_{3} + \\ + 0.00295\varepsilon_{3}^{2} + P_{1}; \\ \dot{\varepsilon}_{3} = 5.7674\varepsilon_{1} + 0.998\varepsilon_{3} + 4.9668\varepsilon_{1}\varepsilon_{3} + \\ + 0.279\varepsilon_{3}^{2} + P_{3}; \end{cases}$$

$$\dot{\varepsilon}_{2} = 1.5155\varepsilon_{2} + 0.0001\varepsilon_{3} + 0.3249\varepsilon_{2}\varepsilon_{3} +$$

$$\begin{cases} \varepsilon_{2} = 1,5155\varepsilon_{2} + 0,0001\varepsilon_{3} + 0,3249\varepsilon_{2}\varepsilon_{3} + \\ + 0,6583\varepsilon_{2}^{2} - 0,1332\varepsilon_{3}^{2} + P_{2}; \\ \dot{\varepsilon}_{3} = -1,0866\varepsilon_{2} + 0,998\varepsilon_{3} - 1,4693\varepsilon_{2}\varepsilon_{3} - \\ -1,3848\varepsilon_{2}^{2} + 0,279\varepsilon_{3}^{2} + P_{3}; \end{cases}$$
 $j = 1.$

Вычислительный эксперимент на основе метода частных систем

Компьютерная модель была создана в среде Simulink Matlab на основании системы уравнений (12), преобразованной к виду в приращениях фазовых переменных.

Для настройки устойчивых движений многосвязную систему рассматривали на основании предла-

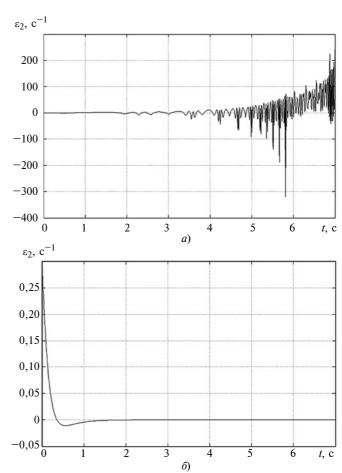


Рис. 4. Графики скорости ϵ_2 звена 2 системы без стабилизации (a) и со стабилизацией (б)

гаемого метода в виде совокупности j-частных систем с двумя обобщенными координатами: ϵ_1 и ϵ_2 , ϵ_1 и ϵ_3 , ϵ_2 и ϵ_3 .

Каждую частную систему настраивали отдельно путем опытного подбора коэффициентов p_j и k_j в законах регуляторов (12), при этом использовали единый модуль, показанный на рис. 2.

Были получены следующие результаты:

3-я частная система (координаты ε_1 и ε_2): $p_1=1$, $k_1=5;\ p_2=2,\ k_2=5;$

2-я частная система (координаты ε_1 и ε_3): $p_1=1$, $k_1=5;\ p_3=0.5,\ k_3=5;$

1-я частная система (координаты ε_2 и ε_3): $p_2=3$, $k_2=3,5$; $p_3=1$, $k_3=5$.

При этом коэффициенты p_j и k_j регулятора, получаемые из разных частных систем, для общей "большой" системы выбираются по критерию максимума:

$$p_{1\text{max}} = 1$$
, $k_{1\text{max}} = 5$; $p_{2\text{max}} = 3$, $k_{2\text{max}} = 5$; $p_{3\text{max}} = 1$, $k_{3\text{max}} = 5$.

На рис. 3, a, 4, a и 5, a представлены собственные движения по скорости звеньев системы под

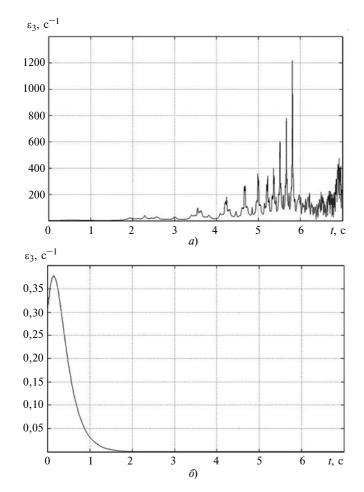


Рис. 5. Графики скорости ε_3 звена 3 системы без стабилизации (a) и со стабилизацией (б)

действием начальных условий без стабилизатора. Видно, что система неустойчивая.

На рис. 3, δ , 4, δ , 5, δ показаны движения системы с настроенными указанным образом регуляторами, из которых видно достижение асимптотической устойчивости системы по Ляпунову в части ее скоростей.

Таким образом, настройку стабилизатора скорости многосвязной квадратичной системы можно осуществить, используя ее декомпозицию на различные комбинируемые двусвязные системы. Принцип настройки заключается в независимом увеличении двух "свободных" параметров предложенных регуляторов в контуре возмущенного движения системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Асанов А. З., Демьянов Д. Н.** Вопросы выбора оптимальной структуры выходной матрицы при изменении спектра передаточных нулей многосвязной динамической системы // Вестник УГАТУ. 2009. Т. 13. № 2 (35). С. 11—17.
- 2. **Лизина Е. А., Щенников В. Н.** Стабилизация многосвязной управляемой гибридной динамической системы с неперекрывающимися декомпозициями // Изв. ву-

- зов. Поволжский регион. Физ.-мат. науки. 2011. № 4 (20). С. 14—23.
- 3. **Стебулянин М. М.** Метод декомпозиции при анализе устойчивости многосвязной мехатронной системы // Вестник МГТУ "Станкин". 2008. № 4. С. 39—44.
- 4. Стебулянин М. М. К синтезу стабилизаторов мехатронных систем в условиях параметрической неопределенности // Вестник МГТУ "Станкин". 2016. № 4 (39). С. 90—93.
- 5. **Лизина Е. А., Щенникова Е. В.** Стабилизация многосвязной непрерывно-дискретной неавтономной системы // Вестник Мордовского университета. Физ.-мат. науки. 2012. № 2. С. 98—103.
- 6. **Пшихонов В. Х., Медведев М. Ю.** Синтез систем управления подводными аппаратами с нелинейными характеристиками исполнительных органов // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2011. № 3 (116). С. 147—156.
- 7. **Стебулянин М. М., Синицын А. Г.** Принцип контурного управления промышленным роботом в режиме технологической неопределенности // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 3 (15). С. 161—163.
- 8. **Макарова Т. А., Стебулянин М. М.** Робастный алгоритм стабилизации движения трехзвенного робота с безредукторным приводом // Вестник МГТУ "Станкин". 2013. № 2 (25). С. 74—79.
- 9. **Лежнина Ю. А., Терновая Г. Н.** Робастное децентрализованное управление с компенсацией возмущений нелинейными многосвязными объектами с запаздыванием по состоянию // Вестник АГТУ. Сер. Управление, вычислительная техника и информатика. 2012. № 2. С. 47—55.
- 10. Стебулянин М. М. К выводу уравнений возмущенного движения класса мехатронных систем // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 3 (15). С. 131—136.
- 11. **Робастная** стабилизация двухроторного многоканального объекта / К. А. Зименко, А. С. Кремлев, А. Е. Поляков, Д. В. Ефимов // Науч.-техн. вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 3. С. 392—398.
- 12. **Kalyadin V. A., Stebulyanin M. M.** Dynamic model of a doubly coupled mechatronic system with elasticity and free play // Russian Engineering Research. 2013. Vol. 33. N. 6. P. 372—374.
- 13. **Кравченко С. А., Набил кип А. Ю., Бирюков В. П.** Многосвязная система управления силой резания и положением резца по поперечной оси // Вестник СГТУ. 2011. № 3 (58). С. 202—205.
- 14. **Кириллов А. Н.** Метод динамической декомпозиции в моделировании систем управления со структурными изменениями // Информационно-управляющие системы. 2009. № 1. С. 20—24.
- 15. **Родионов В. И.** Декомпозиция и метод исследования гироскопических систем, использующих принцип "наведение-стабилизация" // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2016. № 10. С. 301—310.
- 16. **Ешенко А. А.** Аспекты синтеза автоматических управляющих устройств двусвязной системы управления сервоприводами манипуляторов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2014. № 1 (41). С. 76—83.
- 17. **Александров А. Ю., Косов А. А.** Анализ устойчивости положений равновесия нелинейных механических систем на основе декомпозиции // Вестник СПб. ун-та. Сер. 10. 2009. № 1. С. 143—154.
- 18. **Стебулянин М. М.** Комбинационный метод синтеза закона управления многосвязными мехатронными системами в режиме динамического позиционирования // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 10. С. 31—35.

В. В. СЛЕПЦОВ, д-р техн. наук, С. Б. САВИЛКИН, канд. физ.-мат. наук, В. В. ОСИПОВ, С. В. МАЦЫКИН, кандидаты технических наук (МАИ), e-mail: Savilkin@mail.ru

Частотный преобразователь для трехфазных асинхронных электродвигателей с питанием от низковольтного источника постоянного напряжения¹

Для обеспечения работоспособности электроприводов в случае отключения основного электропитания разработан частотный преобразователь для трехфазных электродвигателей с возможностью питания от низковольтного источника постоянного напряжения — аккумуляторных батарей и суперконденсаторов.

Ключевые слова: частотный преобразователь, инвертор, источник бесперебойного питания, асинхронный двигатель.

In order to ensure the working capacity of electric drives in the event of the main power supply being disconnected, a frequency converter for three-phase electric motors with power supply from a low-voltage constant-voltage source — rechargeable batteries and supercapacitors — is developed.

Keywords: frequency converter, inverter, uninterruptible power supply, asynchronous motor.

Частотный преобразователь в комплекте с асинхронным электродвигателем позволяет заменить электропривод постоянного тока. Системы регулирования частоты вращения постоянного тока достаточно просты, но он остается слабым местом электропривода.

Асинхронные электродвигатели превосходят двигатели постоянного тока простотой устройства и надежностью, так как в них нет подвижных контактов, имеют меньшие габаритные размеры, массу и стоимость при той же мощности, при этом просты в изготовлении и эксплуатации. Их основной недостаток — сложность регулирования частоты вращения традиционными способами: изменением питающего напряжения, введением дополнительных сопротивлений в цепь обмоток.

До недавнего времени управление асинхронным электродвигателем в частотном режиме было большой проблемой, несмотря на то, что теория частотного регулирования разработана еще в 30-х годах XX века. Развитие частотно-регулируемого электропривода сдерживалось высокой стоимостью преобразователей частоты. Появление силовых схем с IGBT-транзисторами и разработка высокопроизводительных микропроцессорных схем управления позволили создать современные преобразователи частоты с доступной стоимостью.

В настоящее время существуют различные модели частотных преобразователей [1], отличающиеся мощностью и способами управления. Широко развита элементная база для их изготовления [2]. Несмотря на все различия их объединяет одно — питание от стандартной однофазной или трехфазной электрической сети. Однако их применение ограничивает отсутствие такой сети, например, принципиальное ее отсутствие (полевые условия и т. д.) или жесткие требования к бесперебойному электроснабжению.

С другой стороны, в настоящее время производится множество источников бесперебойного питания (ИБП) [3], в которых применяются аккумуляторные батареи и (или) суперконденсаторы [4]. Данные устройства позволяют получать на выходе напряжение, соответствующее стандартной однофазной или трехфазной сети, но не имеют возможности управлять частотой выходного напряжения.

При необходимости управления частотой вращения электродвигателя от резервного источника возможным решением будет совместное использование ИБП и частотного преобразователя. Однако такое решение не следует рассматривать как оптимальное, так как в электродвигателе происходят множественные взаимообратные преобразования энергии, что снижает их КПД и надежность, увеличивает тепловыделение, габаритные размеры и массу. Кроме того, такое решение имеет еще один серьезный недостаток — сложный переход с основного питания на резервное и обратно.

На рис. 1 приведена структурная схема совместного использования ИБП и частотного преобразователя. Выход источника бесперебойного питания соединен со входом частотного преобразователя. В данном варианте блоки 1, 2 и 3 ИБП и блоки 4 и 5 частотного преобразователя являются лишними. Поэтому предлагается устройство без указанных недостатков, в котором при отсутствии основного напряжения питание блока ключей частотного преобразователя осуществляется напрямую с выхода выпрямителя ИБП.

На рис. 2 приведена схема частотного преобразователя для трехфазных асинхронных электродвигателей с возможностью питания от низковольтного источника постоянного напряжения.

Входные выводы 1, 2 и 3 предназначены для подключения основного источника питания переменного тока 220/380 В, 50 Γ ц, а входные выводы 4

¹ Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0275.

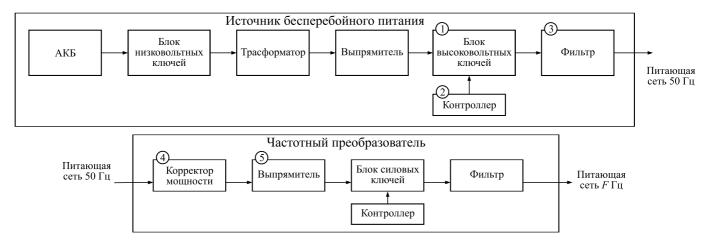


Рис. 1. Схема совместного использования ИБП и частотного преобразователя

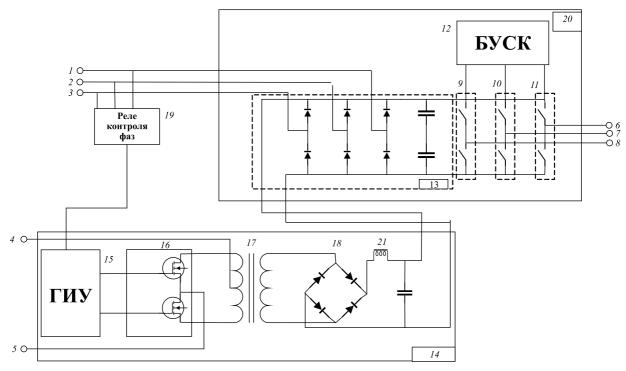


Рис. 2. Схема частотного преобразователя для трехфазных асинхронных электродвигателей с питанием от низковольтного источника постоянного напряжения

и 5 — для подключения резервного источника постоянного напряжения с аккумуляторной батареей и суперконденсатором. Выходные выводы 6, 7 и 8 служат для подключения трехфазного асинхронного двигателя. Преобразователь 20 содержит три блока (9, 10 и 11) однофазных силовых ключей, блок 12 управления этими ключами и трехфазный выпрямитель 13 с емкостным фильтром. Преобразователь содержит инвертор 14, включающий транзисторы 16 с силовыми ключами на основе MOSFET, генератор 15 управления импульсами повышающего трансформатора 17, вторичные обмотки которого подключены к мостовому выпрямителю 18 с L-С-фильтром 21, положительные и отрицательные выходы которого подключены соответственно к положительным и отрицательным

выводам трехфазного выпрямителя 13. Входы реле 19 контроля фаз подключаются к входным выводам 1, 2 и 3 основного источника питания, а выходы — к входу генератора 15.

Основной режим работы частотного преобразователя, когда он подключен к входным выводам I, 2 и 3, т. е. питается от основного источника переменного тока 220/380 В, 50 Гц. Реле 19 контролирует наличие требуемого напряжения во всех трех фазах. В случае корректного напряжения во всех фазах реле вырабатывает выходной сигнал, запрещающий работу генератора 15. При этом силовые ключи транзисторов 16 всегда выключены и ток в первичной обмотке трансформатора 17 отсутствует, а следовательно, отсутствует ток и на его вторичной обмотке.

Трехфазное напряжение от основного источника питания с входных выводов 1, 2 и 3 выпрямляется трехфазным выпрямителем 13 и сглаживается его емкостным фильтром. При этом конденсаторы фильтра заряжаются до напряжения 540 В, приблизительно равного амплитудным значениям переменного напряжения при питании от сети 220/380 В. Выпрямленное напряжение коммутируется однофазными силовыми ключами трех блоков 9, 10 и 11, управляемых блоком 12, что обеспечивает формирование трехфазного переменного напряжения на выходных выводах 6, 7 и 8 методом широкоимпульсной модуляции. Блок 12 управления силовыми ключами не отличается от блока управления ключами в ИБП. В этом случае оказывается, что все диоды мостового выпрямителя 18 в инверторе 14 заперты обратным смещением от выходного напряжения выпрямителя 13, т. е. наличие инвертора 14 в схеме никак не влияет на работу частотного преобразователя.

Таким образом, частотный преобразователь при питании от основного источника переменного тока работает аналогично прототипу.

В случае некорректного основного питания (отсутствия одной или всех фаз) или напряжении ниже допустимого срабатывает реле 19, разрешающее работу генератора 15, который начинает вырабатывать серию противофазных импульсов с частотой ≈ 70 кГц. Эти импульсы обеспечивают коммутацию первичной обмотки повышающего трансформатора 17 с помощью силовых ключей транзисторов 16, т. е. запускается в работу инвертор 14.

Вторичная обмотка импульсного повышающего трансформатора 17 рассчитана так, чтобы выходное напряжение на ней при работе инвертора 14 приблизительно соответствовало амплитудному значению 540 В основного источника питания. Напряжение со вторичной обмотки выпрямляется мостовым выпрямителем 18 и сглаживается L-Сфильтром 21. В данном случае запертыми оказываются все диоды трехфазного выпрямителя 13, так как они находятся под обратным смещением выходным напряжением инвертора 14. При этом однофазные силовые ключи 9, 10 и 11 продолжают работать в прежнем режиме, поскольку получают напряжение питания (≈540 В), как и при питании от основного источника.

Конденсаторы фильтра трехфазного выпрямителя 13 должны иметь емкость, достаточную для обеспечения питания нагрузки в течение времени выхода инвертора 14 на номинальный режим, равного, как правило, нескольким десяткам долей секунды.

При возобновлении основного питания от входных выводов 1, 2 и 3 реле 19 остановит работу ГИУ 15, в результате чего прекратит работу инвертор 14 и схема продолжит работу от основного источника питания, как описано выше. Выбор MOSFET-

транзисторов 16 в качестве блока силовых ключей более предпочтителен для коммутации больших токов при относительно невысоких напряжениях (порядка десятков вольт) по причине весьма низкого сопротивления открытого транзистора, составляющего у современных транзисторов единицы мОм. Этот факт обусловливает низкие потери мощности по сравнению с биполярными или IGBT-транзисторами. Например, при использовании в качестве ключей MOSFET-транзисторов типа IRFP4368PBF фирмы International Rectifier, имеющих сопротивления в открытом состоянии 1,7 мОм, падение напряжения на них при токе 100 А составит 0,17 В. При этом мощность рассеивания на транзисторе составит 17 Вт. Известно, что падение напряжения на открытом биполярном или IGBTтранзисторе мало зависит от протекающего тока и для указанных токов составляет порядка 1÷2 В для биполярного и $2 \div 3 \text{ B}$ — для IGBT-транзистора, поэтому в аналогичном случае на ключевом биполярном транзисторе будет рассеиваться порядка 100÷200 Вт, а на IGBT-транзисторе — 200÷300 Вт.

Инвертор выполнен по двухтактной схеме типа push-pull, более предпочтительной по сравнению с известными схемами (полумост и полный мост) при питании от низковольтного источника. Преимуществом схемы по отношению к полному мосту является меньшее число ключевых элементов (два вместо четырех), что приводит к меньшим потерям на них и упрощает схему управления (отсутствуют верхние ключи). Преимуществом перед полумостовой схемой является меньший в 2 раза ток, проходящий через первичную обмотку, что упрощает конструкцию импульсного повышающего трансформатора (уменьшается сечение провода первичной обмотки). Известно, что в полумостовой схеме "холодный вывод" первичной обмотки трансформатора подключается к выводам питания через разделительные конденсаторы. При этом через них протекает весь потребляемый инвертором ток, который может быть весьма большим. Например, при мощности инвертора 2 кВт, питающегося от источника напряжения 24 В, потребляемый ток составляет 83 А. Все конденсаторы имеют конечную величину эквивалентного последовательного сопротивления, на котором падение напряжения будет приводить к нагреву конденсаторов. Следствием этого будет снижение КПД устройства, а также нежелательный нагрев конденсаторов, который может привести к их выводу из строя.

Таким образом, разработанное устройство обеспечивает использование управляемого электропривода на основе асинхронного двигателя при отсутствии или временном отключении основной сети; имеет больший КПД по сравнению с вариантом объединения ИБП и частотного преобразователя; обеспечивает переход от основной сети к резервной и обратно без разрыва питающей синусоиды.

Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки

(под общей редакцией вице-президента ассоциации инженеров-трибологов России, д-ра техн. наук А. Ю. Албагачиева)

УДК 621.89.017

А. Ю. АЛБАГАЧИЕВ, д-р техн. наук, И. А. БУЯНОВСКИЙ, д-р техн. наук, В. Д. САМУСЕНКО, канд. техн. наук (ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН), А. А. ЧУРСИН, д-р экон. наук, канд. техн. наук (РУДН, Москва), e-mail: albagachiev@yandex.ru

Температурная стойкость космических смазок российского производства

Исследована температурная стойкость вакуумных смазок российского производства. Установлено, что смазки на основе перфторполиэфиров имеют близкие антифрикционные свойства и обеспечивают низкий коэффициент трения при температурах $30 \, ^{\circ}$ С. Лучшую температурную стойкость показали смазок Аметист и Ника.

Ключевые слова: коэффициент трения, температурная стойкость, пластичная смазка.

The temperature resistance of vacuum lubricants produced in Russia was studied. It is determined, that lubricants based on perfluoropolyethers have similar antifriction properties and provide a low coefficient of friction at temperatures of $30\div300\,^{\circ}$ C. The best temperature resistance showed Amethyst and Nika lubricants.

Keywords: friction coefficient, temperature resistance, grease.

Использование пластичных смазочных материалов является одним из способов обеспечения требуемых трибологических характеристик в узлах трения космических аппаратов [1]. Эти смазки должны иметь низкую испаряемость, работать в широком диапазоне температур (от -120 до +200 °C) и иметь радиационную стойкость [2]. Так как в космосе замена смазочного материала невозможна, то для безотказной работы механизмов смазочный материал должен сохранять эксплуатационные свойства на протяжении всего запланированного срока эксплуатации космического аппарата. Одним из важнейших факторов, определяющих работоспособность смазочных материалов, является температура. Поэтому в продолжение работы [3] было исследовано влияние высоких температур на антифрикционные свойства пластичных смазочных материалов, предназначенных для использования в космических аппаратах. Способность смазочного материала обеспечивать стабильный коэффициент трения при граничном смазывании принимали как основной критерий его работоспособности в заданных условиях.

Испытывали четыре образца вакуумных смазок российского производства: ВНИИ НП-274н

(ГОСТ 19337—73), Аметист (ТУ 38.1011029—85), Ника (ТУ 38.1011032—85), Изумруд (ТУ 38.401-58-92—94). Физико-химические характеристики исследуемых смазок представлены в таблице.

Смазка ВНИИ НП-274н специализированная для малогабаритных подшипников качения, работающих при частотах вращения до $n = 3 \cdot 10^4 \text{ мин}^{-1}$, и маломощных редукторов, функционирующих в условиях глубокого вакуума (до $1,33\cdot 10^{-5}$ Па) при температурах от -80 до +160 °C. Для приготовления смазки ВНИИ НП-274н используют жидкость XC-2-1BB, а в качестве дисперсной фазы — мыльный загуститель (11 % литиевого мыла стеариновой кислоты, 6 % литиевого мыла гидрорированного касторового масла), а также фенилальфанафтиламин — 0,5 %.

Смазка Аметист предназначена для узлов, работающих в контакте с агрессивными средами при температурах от -110 до +200 °C и в условиях глубокого вакуума. Она применяется в космической, высоковакуумной и приборной технике разного назначения. Основа — перфторполиэфиры, дисперсная фаза — органосиликагель.

Смазка Изумруд предназначена для узлов, работающих в контакте с агрессивными средами, в том числе с углекислым га-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 31)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Онищенко Г. Б., Соснин О. М.** Силовая электроника. Силовые полупроводниковые преобразователи для электропривода и электроснабжения. М.: Инфра-М, 2018. 122 с.
- 2. **Stefanos Manias.** "Power Electronics and Motor Drive Systems", Academic Press, 2016. 1008 p.
- 3. **Источники** вторичного электропитания / В. А. Головацкий, Г. Н. Гулькович, Ю. И. Конев и др.; Под ред. Ю. И. Конева. М.: Радио и связь, 2000. 420 с.
- 4. **Тонкопленочные** технологии формирования покрытий на поверхности высокопористых рулонных материалов для конденсаторных структур / В. В. Слепцов, С. Н. Куликов, Д. Ю. Кукушкин, Ву Дык Хан // Нано-инженерия. 2015. № 3. С. 7—14.

зом при температурах от -130 до +250 °C и в условиях глубокого вакуума. Основа — перфторполиэфиры, дисперсная фаза — органосиликагель, содержит растворимую в перфторполиэфирах металлоплакирующую присадку.

Смазка Ника — антифрикционная для подшипников качения, работающих в вакууме при температуре от -120 до +250 °C. Основа — перфторполиэфиры, дисперсная фаза — политетрафторэтилен, содержит присадки.

Методы исследования

Исследование проводили по четырехшариковой схеме на машине трения КТ-2 [4], которая позволяет оценивать коэффициент трения в широком диапазоне рабочих температур. Образцы шарики из стали 100Cr6 диаметром 7,94 мм, нагрузка на узел трения 110 Н, частота вращения верхнего шара 1 мин $^{-1}$. Исследование проводили при температурах 30÷300 °C. Температура узла трения ступенчато повышалась со скоростью 5 °С/мин. Коэффициент трения оценивали в течение 60 с через каждые 10 °С. После испытаний шарики промывали в бензине, очищая от смазочного материала, и измеряли диаметр пятен износа.

Результаты и обсуждение

Результаты испытаний четырех смазок приведены на рис. 1, показаны средние значения и разброс значений коэффициента трения в процессе трения при заданной температуре.

Показатели физико-химических свойств исследуемых пластичных смазочных материалов

Смазка	Колло- идная ста- биль- ность, %	Предел прочности на сдвиг при $T = 50$ °C, Па	Испаря- емость в вакууме за 30 мин при $T=120^{\circ}\mathrm{C},$
ВНИИ НП-274н Аметист Изумруд Ника	14,2 7,5 13 12	150 200 180 180	Не нор- мируется 2,5 2,5 4

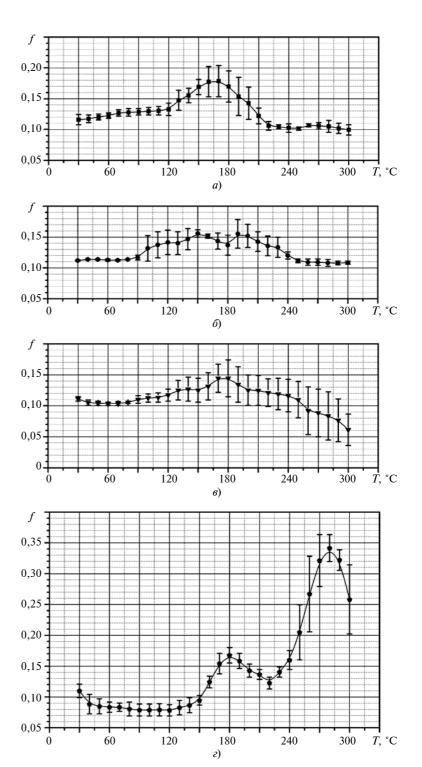


Рис. 1. Зависимость коэффициента f трения от температуры T для смазок Аметист (a), Изумруд (δ), Ника (s), ВНИИ НП-274н (ϵ)

Установлено, что зависимости коэффициента трения от температуры для трех смазок Аметист, Изумруд и Ника, полученных на основе перфторполиэфиров, но с разными загустителями, имеют схожий характер — коэффициент трения плавно повышается от $f = 0.10 \div 0.12$ при невысоких

температурах до $f = 0.14 \div 0.2$ при $T = 150 \div 180$ °C, а затем снижается. Коэффициенты трения для смазок Аметист и Изумруд, имеющих органосиликагелевый загуститель, находятся на уровне f = 0.1, а для смазки Ника, загуститель которой — политетрафторэтилен, с повышением темпера-

туры испытаний он продолжает снижаться и при предельной температуре составляет $f = 0.05 \div 0.08$.

При температурах выше 180 °C снижение коэффициента трения, вероятно, обусловлено образованием на поверхности пленок, которые уменьшают непосредственный контакт стальных образцов.

На рис. 2 показаны пятна износа, полученные после испытании смазок до T = 300 °C. Видно, что на поверхности трения образовалась пленка, а на образце,

испытанном со смазкой Ника, пленка образовалась и за границами пятна износа.

Смазка ВНИИ НП-274н (см. рис. 1, ϵ) ведет себя как типичная поверхностно-активная среда. При $T = 30 \div 140$ °C она обеспечивает низкий коэффициент трения $0,07 \div 0,09$, а при T > 150 °C коэффициент трения быстро повышается вследствие разрушения смазки под воздействием температуры.

Средние диаметры пятен износа составили: для смазки Изум-

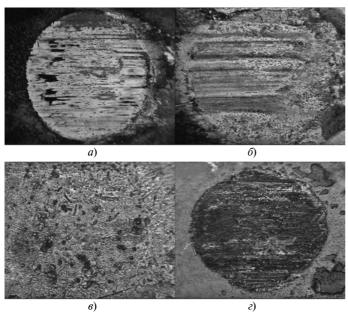


Рис. 2. Микрофотографии пятен износа при испытаниях для смазок Аметист (a), Изумруд (δ), Ника (a), ВНИИ НП-274н (ϵ)

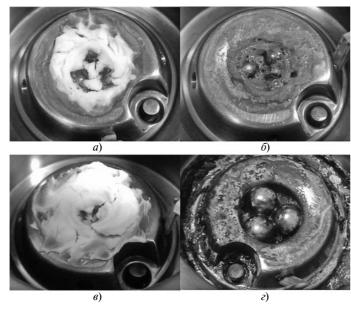


Рис. 3. Смазки Аметист (а), Изумруд (б), Ника (в), ВНИИ НП-274н (г) после испытаний

руд — 225 мкм, ВНИИ НП-274н — 215 мкм, Ника — 215 мкм, Аметист — 214 мкм. Несмотря на то, что смазка ВНИИ НП-274н разрушилась и коэффициент трения повысился до 0,35, на износ это не оказало значительного влияния, что указывает на образование в процессе трения на поверхностях устойчивой износостойкой пленки, которая может защищать некоторое время место контакта даже после разрушения смазочного материала.

На рис. 3 показаны смазочные материалы после проведения испытаний до $T=300\,^{\circ}$ С. Смазки Аметист и Ника практически не изменились. Смазка Изумруд потемнела и приобрела вместо зеленого коричневый цвет. Смазка ВНИ ИНП-274н полностью разрушилась в процессе испытания.

Таким образом, установлено, что лучшую термостойкость по-казали смазки Аметист и Ника. Смазка Изумруд также обеспечивает стабильный коэффициент трения, но окисляется, что, видимо, является результатом содержания в ней присадок.

Смазка ВНИИ НП-274н под воздействием температур свыше 150 °C разрушается, поэтому ее можно рекомендовать только для узлов трения, в которых не возникают высокие температуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Jones W. R., Jansen M. J.** Tribology for space applications // Journal of Engineering Tribology. Par. J. 2008. Vol. 222. N. 8. P. 997—1004.
- 2. Маленков М. И., Каратушин С. И., Тарасов В. М. Конструкционные и смазочные материалы космических механизмов. СПб.: Балтийский ГТУ "ВОЕНМЕХ", 2007. 54 с.
- 3. **Смазочные** материалы для механизмов, работающих в космосе / М. В. Прожега, А. Ю. Албагачиев, Н. И. Смирнов, Н. Н. Смирнов // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 4. С. 421—427.
- 4. **ГОСТ 23.221—84.** Обеспечение износостойкости изделий. Метод экспериментальной оценки температурной стойкости смазочных материалов при трении. М.: Изд-во стандартов, 1985.

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9:519.876

В. А. ХОЛОПОВ, канд. техн. наук, С. В. АНТОНОВ, Е. В. КУРНАСОВ, канд. техн. наук, Е. Н. КАШИРСКАЯ, канд. техн. наук (РТУ МИРЭА), e-mail: holopov@gmail.com, e-mail: serge.antonov.1@gmail.com

Разработка и применение цифрового двойника машиностроительного технологического процесса¹

Проанализированы определения понятия "цифровой двойник" (ЦД). Показано, что мониторинг машиностроительного технологического процесса можно реализовать на основе процесса ЦД. Дано определение ЦД технологического процесса (ТП). Предложены метод его построения и структура для описания ТП многономенклатурного машиностроительного производства. Приведен алгоритм решения задачи мониторинга ТП на основе процесса ЦД.

Ключевые слова: цифровой двойник, жизненный цикл, цифровое производство, мониторинг, технологический процесс, промышленная автоматизация, программа Индустрия 4.0, машиностроение.

The definitions of the concept "digital twin" (DT) are analyzed. It is shown that the monitoring of the engineering technological process can be implemented on the basis of the DT process. The definition of the DT technological process (TP) is given. The method of its construction and structure for the description of the TP of multi-product engineering production are proposed. An algorithm for solving the problem of TP monitoring based on the DT process is given.

Keywords: digital twin, life cycle, digital production, monitoring, technological process, industrial automation, Industry 4.0 program, engineering.

В ходе непрерывного технологического прогресса установилась тенденция к цифровизации всех сфер жизни человека. Эта тенденция проявилась и в производственной сфере [1]. На сегодняшний день активно развиваются государственные программы по внедрению принципов цифрового производства. Среди таких программ и объединений, их реализующих, основными и наиболее известными являются программы: Индустрия 4.0 (Германия), Консорциум промышленного интернета (США), Консорциум ІоТ Acceleration (Япония) и др.

В России наиболее популярна концепция Индустрии 4.0. Она предусматривает переход от автоматизированного к интеллектуальному производ-

¹ Исследования проведены при поддержке РТУ МИРЭА в рамках инициативной научно-исследовательской работы ИЦМР-12 "Создание информационной системы управления сборочным производством сложных изделий".

ству, в структуре которого предполагается создание единого информационного пространства производственной системы. Такая трансформация производства обеспечивает повышение его эффективности без существенных материальных затрат, а также качества и кастомизации выпускаемой продукции [2]. Среди проблем, которые решает внедрение концепции Индустрии 4.0 на различных производственных уровнях, можно выделить [3, 4] следующие:

проблемы управления данными внутри предприятия;

проблемы сбора, анализа и хранения больших объемов данных от множества источников и конечных устройств;

проблемы обеспечения необходимого предприятию уровня гибкости производственных систем и др.

Одним из инструментов решения поставленных выше проблем представляется цифровой двойник (ЦД), который является неотъемлемой частью концепции Индустрии 4.0 [1], а его применение позволяет решить различные задачи информационного обеспечения, сопровождения и обслуживания процессов производства изделий в цехе.

Общие понятия цифрового двойника

В зарубежных и российских научных публикациях были определены наиболее общие подходы к созданию ЦД, которые позволяют говорить о ЦД как о концепции или наборе концептуальных идей для формирования цифровых моделей объектов и процессов реального мира [5].

Ввиду многообразия объектов и процессов моделирования и создания ЦД в литературе предлагаются классификации, отличающиеся основным ее принципом. Один из таких принципов — классифицирование по типу объекта моделирования, которым в производственной сфере могут быть изделие, деталь, партия изделий, технологический процесс (ТП) и цифровое предприятие [6]. В качестве другого принципа [7] предлагается классифицирование по типу содержащейся в ЦД информации, которая может быть статической или динамической и либо отражать состояние объекта моделирования в одном промежутке или моменте времени, либо изменяться в режиме реального времени и быть связанной с этим объектом или группой однотипных объектов. В статье F. Chinesta и других авторов [8] предлагается наиболее близкий нам подход к классификации ЦД, основанный на его структуре и содержащихся в нем значениях параметров, которые также могут либо быть получены единовременно, либо подвергаться изменениям в режиме реального времени, а при создании сложных моделей для анализа характеристик ЦД могут применяться интеллектуальные методы обработки данных, входящие в состав ЦД в качестве программных модулей.

В работах [7, 9, 10] описаны решения прикладных производственных задач, где также даны определения ЦД, обобщая которые, можно утверждать, что в производственной сфере под ЦД понимается модель, программный продукт или информационно-техническая система, являющаяся аналогом или виртуальным образом реального физического объекта. Например, в работе [11] ЦД является 3D-моделью объекта, а в работе [6] — единой информационной средой.

На основании исследования L. F. C. S. Durão и группы других авторов [9], а также публикаций [12—14] выявлены следующие свойства ЦД, которыми наиболее часто наделяют их разработчики:

обработка данных в режиме реального времени; интегрируемость с другими системами; точность моделирования.

В статьях [8, 15] показано, что в рамках концепции Индустрии 4.0 для решения производственных задач в качестве объектов моделирования при создании ЦД рассматриваются ТП, оборудование, технические средства автоматизации, производственные системы и др., способные образовывать единое информационное пространство обмена данными, описывающими объекты с точки зрения их жизненного цикла.

Формирование подобного виртуального пространства, которое представляет собой отображение протекающих производственных и организационных процессов в нем, повышает уровень их автоматизации на предприятии, что упрощает решение задач их оптимизации и управления. Такой подход применялся при разработке систем эксплуатации промышленных объектов [12], умных производственных систем [11, 16, 17], контроля качества [18], предиктивного анализа [8], мониторинга ТП [19, 20] и т. д.

Анализ научно-технической литературы показал, что использование ЦД целесообразно для решения задачи мониторинга ТП в условиях многономенклатурного мелкосерийного производства, выпускающего изделия с длительным жизненным циклом при использовании труднообслуживаемого оборудования, что подтверждается соответствием

критериям, разработанным Е. В. Прониной [19], которые определяют рациональность применения систем мониторинга ТП для рассматриваемых типов производств, а также показанной эффективностью применения ЦД в системах мониторинга ТП и на уровнях цеха и завода в работах других авторов [5, 11, 15].

Определение цифрового двойника технологического процесса

Для решения поставленной в данной статье задачи выполнения мониторинга ТП необходимо сформировать концептуальный подход и дать определение ЦД, соответствующее этой задаче.

При мониторинге ТП выполняется контроль значений его параметров и ресурсного обеспечения, поэтому при создании ЦД объектом моделирования становится ТП, для которого следует выбрать оптимальный набор контролируемых параметров, учесть случайные внешние воздействия на управление процессами, способные вызвать критические отклонения от номинальных значений параметров и выработать правила, определяющие алгоритмы сравнения заданных и полученных в процессе обработки значений параметров ТП.

Для решения поставленных задач под ЦД ТП будем понимать информационно-логическую структуру, описывающую ключевые параметры ТП и его протекание. Предполагаем, что ЦД ТП будет обладать свойствами многоуровневой структуры, которая имеет объектно-ориентированную иерархию, состоящую из классов и подклассов, определяющих и описывающих реализуемый ТП на основе его параметров, а также свойствами информационно-логической модели ТП, включающей входные и выходные данные для каждой операции обработки изделий и условия перехода между ними.

Посредством ЦД ТП необходимо решить задачи моделирования и мониторинга ТП, включая анализ результатов мониторинга в виде сравнения полученных значений параметров ТП и заданных технологом допусков. Поэтому предлагается использовать ЦД двух типов: ЦД, разрабатываемый технологом, и ЦД, получаемый в процессе протекания ТП. Такой подход позволит реализовать этап сравнения параметров и выполнять мониторинг ТП на основе заданных технологом допусков параметров, что в целом обеспечит необходимый уровень гибкости системы и создаст единое информационное пространство на уровне цеха.

ЦД ТП, разработанный технологом и содержащий параметры ТП и его предполагаемого ресурсного обеспечения, будем называть α-ЦД, а ЦД ТП, созданный на основе реализуемого ТП и содержащий фактические значения параметров обработки конкретной детали и примененных ресурсов, будем называть β-ЦД. Цифровой двойник α-ЦД предназначен для описания ТП до начала его реализации

при изготовлении конкретного изделия, а β-ЦД — для фиксации параметров ТП и ресурсов, применяемых при изготовлении изделий.

Особенности α-ЦД состоят в том, что он:

- 1) является динамической моделью ТП, которая может оптимизироваться или модифицироваться под влиянием внутренних и внешних факторов соответственно;
 - 2) создается технологом при разработке ТП;
- 3) не полностью определен на всех стадиях производства, так как не привязан к ТП обработки конкретной детали и не содержит значений параметров и ресурсного обеспечения ТП (т. е. может быть определен тип станка, приспособления или инструмента, но не определены их марка, модель, инвентаризационный номер или могут быть установлены требования к квалификации работника, но не указан конкретный исполнитель операции и т. д.).

Особенности β-ЦД состоят в том, что он:

- 1) является статической моделью, которая после завершения всех технологических операций недоступна для внесения изменений;
- 2) формируется на основе α-ЦД и содержит значения параметров ТП и его ресурсного обеспечения, полученные при производстве изделий;
- 3) на стадии выпуска готового изделия является полностью определенным.

Таким образом, для каждого ТП будет создан α -ЦД, с которым в процессе производства будет связан набор моделей ТП по изготовлению партии изделий, т. е. группа β -ЦД, а в частном случае — при высоких требованиях к качеству выпускаемой продукции каждый β -ЦД будет соответствовать одному изделию.

Жизненный цикл цифрового двойника технологического процесса

Назначения и функции α-ЦД и β-ЦД позволяют определить циклически повторяющиеся этапы, которые проходит α-ЦД, начиная с процесса проектирования ТП и заканчивая выпуском изделий и дальнейшей работой с этими моделями ТП.

В ходе изучения публикаций по разработке и применению ЦД было выявлено, что наиболее часто эта концепция реализуется для продукта или изделия, тогда как для ТП она используется редко. В статье О. В. Демьяновой и А. Р. Диммиевой [11] показано, что ЦД применяется на всех этапах жизненного цикла изделия, но в отношении ЦД ТП термин "жизненный цикл" в литературе не используется. Для того чтобы определить, в каком промежутке времени относительно этапов производства изделия существует ЦД ТП, следует ввести термин "жизненный цикл ЦД ТП", под которым будем понимать совокупность повторяющихся процессов от стадии создания ЦД и до его утилизации.

Определим этапы жизненного цикла ЦД ТП (рис. 1). Как было показано ранее, α -ЦД формиру-

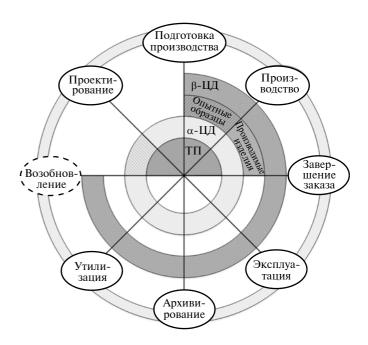


Рис. 1. Жизненный цикл α-ЦД

ется при разработке ТП технологом и существует в процессе его реализации, но после завершения выпуска изделий α-ЦД передается в архив и утилизируется. Под архивированием мы понимаем процесс передачи ЦД в информационное хранилище с возможностью оперативного доступа, а под утилизацией — передачу ЦД в архив долговременного хранения без возможности оперативного доступа, откуда затем он может быть удален или переведен обратно в область оперативного доступа.

Цифровой двойник β -ЦД создается на основе α -ЦД в процессе производства изделия, к которому он привязан, а затем хранится и используется на протяжении всего жизненного цикла изделия без изменений. При производстве он используется для мониторинга ТП, для анализа полученных значений, может использоваться для послепродажного обслуживания и т. д.

Таким образом, жизненный цикл α-ЦД начинается с его создания технологом и передачи в архив оперативного доступа на этапе проектирования $T\Pi$, на котором вырабатываются требования к $T\Pi$, и на основе этого разрабатывается соответствующая документация. На этапе подготовки производства могут быть выпущены опытные образцы и сформированы тестовые в-ЦД, а если такой этап отсутствует, то первые в-ЦД формируются сразу на стадии производства. При завершении заказа все β-ЦД архивируются и передаются на долговременное хранение, после чего их жизненный цикл заканчивается без возможности возобновления, так как β-ЦД является источником данных, которые связаны с определенным изделием или партией изделий, а не с ТП.

Мониторинг технологического процесса на основе цифрового двойника

1. Создание а-ЦД.

Наиболее важным этапом жизненного цикла α -ЦД является его создание. Схема создания α -ЦД представлена на рис. 2.

Перед созданием α -ЦД на предприятие поступает заказ на производство изделия, а когда предприятие его принимает, заказчик дополнительно передает 3D-модель изделия или ЦД изделия (ЦДИ). Далее технолог завода-изготовителя разрабатывает α -ЦД и ТП для выполнения заказа, на их основе технологом разрабатывается соответствующая документация согласно ГОСТ 3.1404—86 и создается план производства.

На этапе проектирования α -ЦД разрабатывается его структура, содержащая параметры $T\Pi$ и его ресурсного обеспечения, а в процессе отладки и реализации $T\Pi$ α -ЦД может быть модифицирован или оптимизирован.

Под модификацией α -ЦД мы понимаем процесс внесения в него вынужденных изменений и создания его новой версии вследствие внешних причин, связанных с изменением конструктивных характеристик изделия, материала, изменения производственных условий и т. д., а под оптимизацией α -ЦД — процесс его совершенствования без создания новой версии вследствие внутренних причин, связан-

ных с ошибками при разработке, мероприятиями по повышению эффективности производства, которые, например, могут проводиться по методике "отжига", описанной в работе [21], и т. п.

На этапе запуска производства на основе α -ЦД формируется β -ЦД, на основе которого реализуются функции мониторинга посредством добавления дополнительных полей для хранения значений фиксируемых параметров ТП и применяемых ресурсов.

По завершении производства партии изделий β-ЦД становится полностью определенным и используется для выполнения анализа данных, полученных в процессе мониторинга ТП, в результате чего система мониторинга ТП показывает, соответствует ли выполненный ТП требованиям технолога.

При выполнении всего заказа детали отгружаются заказчику, ЦД продолжают проходить этапы своих жизненных циклов, α-ЦД после выполнения заказа архивируется вместе со всеми его версиями без возможности оперативного доступа.

2. Структура а-ЦД.

Как было сказано выше, ЦД ТП представляет собой информационно-логическую структуру, описывающую протекание ТП и его ключевые параметры, которые состоят из параметров ТП и его ресурсного обеспечения. Набор этих параметров ТП, описывающих требования технолога к его выполнению, можно представить в виде объектно-ориентированной структуры (рис. 3).

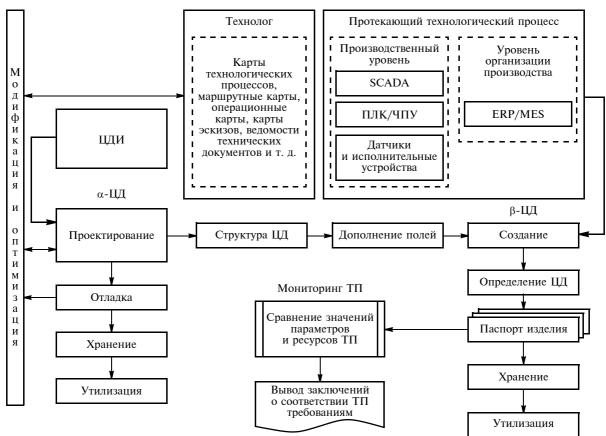


Рис. 2. Схема создания ЦД

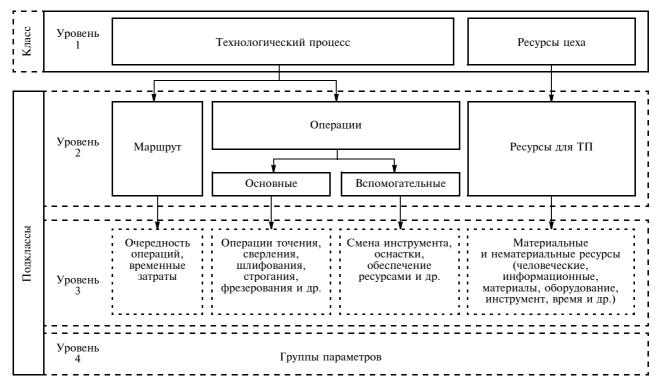


Рис. 3. Объектно-ориентированная структура параметров и ресурсов ЦД ТП

Предлагаемая структура ЦД включает в себя классы ТП и ресурсы, которыми располагает цех (уровень 1). Класс ТП содержит три подкласса (уровень 2): маршрут и вспомогательные и основные операции. Каждый из этих подклассов разбивается на более мелкие подклассы (уровень 3), которые объединяют укрупненные группы параметров и ресурсов ТП. В подклассе "маршрут" такими группами являются очередность и временные затраты, а в подклассе "операции" — их различные типы, например, точение, фрезерование, шлифование, смена инструмента и оснастки, установ и др. К ресурсам относятся материалы, информационное обеспечение, оборудование и инструмент и т. д. На уровне 4 иерархии содержатся обобщенные по смысловому признаку группы параметров, которые включают в себя уже отдельные параметры, например, силу резания, частоту вращения шпинделя, тип сверла, номер операции и др.

Отдельные параметры являются структурными единицами ЦД, на основе которых собирается информация для мониторинга ТП (рис. 4).

Для каждого отдельного параметра в α-ЦД задаются поля его допуска, единицы измерений, время получения значения (от начала выполнения операции), источник данных и тип контроля. Поле допуска параметра содержит интервал, определяющий диапазон значений, которые может принимать данный параметр или ресурс ТП. Если такой параметр является числовым, задается диапазон числовых значений, для других типов данных могут задаваться допустимые числовые или текстовые ва-

рианты значений, а для ресурсов указывается ссылка на базу данных с этими ресурсами. Под источником данных мы понимаем лицо или систему, которые должны будут внести значение параметра или ресурса ТП в соответствующее поле значений параметра β-ЦД. Поле "время получения значения"

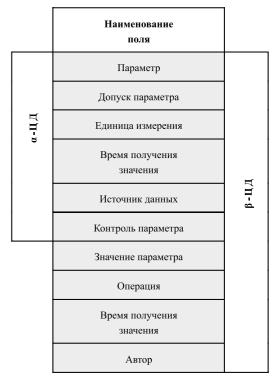


Рис. 4. Структура α-ЦД и β-ЦД

содержит диапазон временных значений, который определяет, в какой момент времени от начала операции должны быть получены значения параметра или ресурса ТП. В поле "контроль параметра" указывается тип контроля для системы мониторинга ТП, которая анализирует только контролируемые параметры.

Технолог при разработке α-ЦД может по своему усмотрению оставить то или иное поле пустым. В процессе проектирования он рассматривает множество параметров ТП и ресурсов, которые можно разделить на несколько групп. Параметры выпускаемых изделий в данной работе не рассматриваются, кроме случаев применения операций контроля, которые включаются в ТП и α-ЦД. Соответствующие значения также должны получить фиксируемые в процессе обработки параметры, среди которых выделяются контролируемые и неконтролируемые. Контролируемые параметры ТП будем называть ключевыми, так как они прямым образом влияют на качество производимых изделий и определяются технологом с необходимой точностью. ЦД состоит не только из них, но именно они используются при мониторинге ТП для операций сравнения. Для неконтролируемых параметров допуски могут быть не заданы.

В начале реализации ТП для партии изделий создается β -ЦД на основе α -ЦД и дополняется полями, которые служат для реализации функции мониторинга и фиксации значений параметров и ресурсов ТП, поэтому β -ЦД включает дополнительные поля, содержащие значения фиксируемых параметров и ресурсов ТП, время их получения, номер выполняемой операции, а также поле с информацией о том, кто фактически внес данные значения.

Поле "значение параметра" содержит численные или текстовые значения параметров ТП. Поле "операция" содержит ее идентификационный порядковый номер с целью поддержания логической связи параметра и ресурса ТП с тем, на какой операции он был получен. Поле "автор" содержит информацию о том, кто внес значения и атрибуты параметра или ресурса ТП. Это может быть либо человек (например: мастер цеха, оператор, рабочий, технолог цеха, начальник цеха и т. д.), либо система (например, операционное оборудование, станки с ЧПУ, дополнительные измерительные системы, системы управления верхнего уровня и т. д.).

3. Выполнение мониторинга технологического процесса на основе цифрового двойника.

На этапе выполнения мониторинга ТП создается и доопределяется β -ЦД. Перед началом производства система мониторинга ТП загружает α -ЦД из архива и переходит к первой технологической операции. Если такой α -ЦД не найден или его структура некорректна, система мониторинга ТП останавливает свою работу с ошибкой.

После копирования структуры α -ЦД в β -ЦД начинается итерационный процесс мониторинга ТП для операций обработки изделия, каждый цикл которого можно разделить на две части: ресурсное доопределение и фиксирование параметров ТП для β -ЦД.

На этапе ресурсного доопределения осуществляется наполнение β-ЦД данными о ресурсах цеха, которые будут использованы для реализации операций ТП. На этом этапе возможно возникновение четырех ситуаций, разрешаемых следующим образом:

- 1) если все ресурсы доступны в соответствии с требованиями технолога, которые он отразил в загруженной структуре α -ЦД, то осуществляется переход к стадии фиксирования параметров ресурсного обеспечения ТП;
- 2) если некоторые ресурсы недоступны, но могут быть допоставлены, то данное действие запрашивается со склада оператором;
- 3) если некоторые ресурсы недоступны и незначимы, то оператор игнорирует требование системы мониторинга ТП;
- 4) если некоторые ресурсы недоступны, значимы и их допоставка невозможна, то оператор останавливает ТП вместе с его системой мониторинга.

Заметим, что допоставка соответствующих или заменяющих ресурсов необходимого качества на участок проведения операции обработки должна быть реализована в отведенное время, а ответственное лицо должно подтвердить соответствие доставленных ресурсов требованиям ТП, либо запросить новую поставку с целью устранения несоответствий параметров поставленных ресурсов.

Время ожидания определяется на основе специфики производства и зависит от уровня автоматизации предприятия, поэтому β -ЦД доступен для редактирования и доопределения в режиме реального времени в течение всей осуществляемой операции по обработке изделия и до начала следующей, либо β -ЦД полностью определяется перед началом операции в зависимости от ее типа. Такой подход наиболее эффективен при высокоуровневой автоматизации операций $T\Pi$.

При использовании ресурсов в производстве изделий также могут возникать ситуации, приводящие к следующему:

- 1) если используемый ресурс полностью удовлетворяет требованиям технолога, то выполнение операций продолжается в штатном режиме;
- 2) если используемый ресурс не полностью удовлетворяет требованиям технолога, когда операция остается еще выполнимой, то оператор получает предупреждение об этом несоответствии и продолжение реализации ТП возможно только под его ответственность;
- 3) если используемый ресурс не удовлетворяет требованиям технолога, когда дальнейшая реализа-

ция $T\Pi$ невозможна, то оператору предлагается остановить $T\Pi$.

Процесс фиксации параметров ТП построен аналогичным образом: в течение операции обработки изделия и до начала следующей параметры ТП фиксируются, а затем внесение данных в β-ЦД для данной операции запрещается.

По завершении первых двух этапов сбора значений параметров ТП и данных о ресурсах система считает операцию завершенной, и цикл повторяется для следующей операции до завершения всего ТП, после чего система его мониторинга выполняет анализ данных и составляется отчет.

Заключение

Анализ литературы и разработка концептуального подхода к решению задачи выполнения мониторинга ТП показали, что проектирование системы мониторинга ТП может быть основано на применении ЦД для цифрового производства. Жизненный цикл ЦД ТП связан с этапами производства, проектирования ТП и жизненным циклом производимых изделий. Предложенный метод описания ТП на основе ЦД ТП позволяет решить проблемы управления информационными потоками на предприятии без существенных материальных затрат. Использование ЦД ТП, связанного с заданными технологом и фактическими значениями параметров ТП и его ресурсным обеспечением, открывает возможность для мониторинга ТП в режиме реального времени. Это позволит эффективно и оперативно принимать управленческие решения на основе проводимого анализа данных, что, в свою очередь, сократит издержки предприятия. Реализация системы мониторинга ТП на основе предложенного подхода открывает широкие возможности для кастомизации самой системы в соответствии с требованиями заказчиков для последующего повышения эффективности управления качеством выпускаемых изделий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Smart** manufacturing systems for Industry 4.0: conceptual framework, scenarios, and future perspectives / P. Zheng, H. Wang, Z. Sang et al. // Frontiers of mechanical engineering. 2018. V. 13. N. 2. P. 137—150.
- 2. **Thoben K. D., Wiesner S. A., Wuest T.** "Industrie 4.0" and smart manufacturing-a review of research issues and application examples // Int. J. Autom. Technol. 2017. V. 11. N. 1. P. 4—16.
- 3. **Khan A., Turowski K.** A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0 // Proceedings of the first international scientific conference "Intelligent information technologies for industry" (IITI'16). 2016. V. 450. P. 15—26.
- 4. **Development** of digital machine-building production in the Industry 4.0 concept / V. A. Kholopov, E. N. Kashirskaya, A. P. Kushnir et. al. // Journal of Machinery Manufacture and Reliability. 2018. V. 47. N. 4. P. 380—385. DOI: 10.3103/S1052618818040064.

- 5. **Cyber-physical** integration for moving digital factories forward towards smart manufacturing: a survey / Y. Cheng, Y. Zhang, P. Ji et al. // The international journal of advanced manufacturing technology. 2018. V. 97. N. 1—4. P. 1209—1221.
- 6. **Modeling** of digital twin workshop based on perception data / Q. Zhang, X. Zhang, W. Xu et al. // International conference on intelligent robotics and applications. Springer, Cham, 2017. V. 8103. P. 3—14.
- 7. **Будникова А. А., Кондратьев В. Ю.** Цифровые двойники // Сб. материалов XI междунар. студенческого форума "Информационное общество: современное состояние и перспективы развития". Краснодар: КубГАУ, 2018. С. 132—136.
- 8. **Virtual**, digital and hybrid twins: a new paradigm in data-based engineering and engineered data / F. Chinesta, E. Cueto, E. Abisset-Chavanne et al. // Archives of computational methods in engineering. 2018. V. 4. P. 1—30.
- 9. **Digital** twin requirements in the context of industry 4.0 / L. Durão, S. Haag, R. Anderl et al. // IFIP International conference on product lifecycle management. Torino: Springer, 2018. V. 540. P. 204—214.
- 10. **Степынин С. С.** Цифровой двойник, как инструмент подготовки производства // Сб. тезисов докладов XLIV Междунар. молодежной науч. конф. "Гагаринские чтения 2018". М.: НИУ МАИ, 2018. С. 245, 246.
- 11. Демьянова О. В., Диммиева А. Р. Жизненный цикл и возможности цифровой трансформации компании // Современные проблемы управления и регулирования. 2018. С. 108—119.
- 12. **Комраков А. В., Сухоруков А. И.** Концепция цифрового двойника в управлении жизненным циклом промышленных объектов // Сетевой научный журнал "Научная идея". 2017. Т. 3. № 3. С. 3—9.
- 13. **Digital** twin-driven product design, manufacturing and service with big data / F. Tao, J. Cheng, Q. Qi et al. // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. V. 94. N. 9—12. P. 3563—3576.
- 14. **Ромашкова И. А., Лосаберидзе Т. Л.** Реализация концепции "цифрового двойника" в российском производстве как этап перехода к четвертой промышленной революции // Постулат. 2018. Т. 31. № 5-1. С. 139—144.
- 15. **Биктимиров В. Р., Ращупкина А. А.** Современные методики управления качеством. Цифровой двойник // Современные научные исследования и разработки. 2018. Т. 25. № 8. С. 34—36.
- 16. **Digital** twin-driven manufacturing cyber-physical system for parallel controlling of smart workshop / J. Leng, H. Zhang, D. Yan et al. // Journal of ambient intelligence and humanized computing. 2018. V. 10. N. 3. P. 1—12.
- 17. **Modular** based flexible digital twin for factory design / J. Guo, N. Zhao, L. Sun, S. Zhang // Journal of ambient intelligence and humanized computing. 2018. V. 10. N. 3. P. 1—12.
- 18. **Zarubin S. G., Deev K. A.** Process model of digital manufacturing // Russian Engineering Research. 2017. V. 37. N. 8. P. 714—719.
- 19. **Пронина Е. В.** Цифровой двойник в современном производстве // Сб. материалов XXXV Междунар. научпракт. конф. "Scientific prospectives". Астрахань: Научный центр "Олимп", 2017. С. 58—60.
- 20. **Тарасов И. В., Попов Н. А.** Индустрия 4.0: трансформация производственных фабрик // Стратегические решения и риск-менеджмент. 2018. Т. 106. № 3. С. 38—53.
- 21. **Холопов В. А., Каширская Е. Н., Гусев М. В.** Оптимизация конфигурации промышленных Ethernet-сетей на этапе проектирования АСУП // Российский технологический журнал. 2018. Т. 6. № 2 (22). С. 20—31.

А. А. КОРОСТЕЛКИН, О. И. КЛЯВИН, М. В. АЛЕШИН (ФГАОУ ВО "СПбПУ"), ВАН ГОДУН (BAIC YinXaing Automobile Co. LTD, Чунцин, Китай), ВАН СУЙФЭН (BAIC YinXaing Automobile Co. LTD, Чунцин, Китай), ЛЮ ДЗИНИ (Чунцинский автомобильный университет, Китай), e-mail: korostekin@compmechlab.com

Оптимизация массы кузова в контексте краш-теста автомобиля класса внедорожник

На примере разработки цифрового двойника кузова внедорожника SUV представлена методика снижения материалоемкости и массы внедорожника на основе топологической, параметрической и многовариантной оптимизаций элементов кузова, их материалов и толщин при сохранении ограничений локальной и общей жесткости, прочности и требований безопасности при столкновении.

Ключевые слова: внедорожник, цифровой двойник, материалоемкость, масса, элементы кузова.

Using the example of the development of a digital twin of the SUV off-road vehicle body a methodic of reducing the material consumption and mass of the off-road vehicle based on topological, parametric and multivariate optimization of body elements, their materials and thicknesses while maintaining the limitations of local and overall stiffness, strength and safety requirements in a collision, is presented.

Keywords: off-road vehicle, digital twin, material consumption, mass, body elements.

Технологический прогресс, ускорение и эволюция производственных процессов создали четкую тенденцию в автомобильной промышленности — снижение массы кузова автомобиля [1]. В настоящее время массу кузова в основном можно снизить либо путем использования легких материалов, таких как алюминиевые сплавы, усиленные углеродным волокном полимеры (CFRP) и другие композиты, либо с помощью широкоприменяемых быстрорежущих (HS), высокопрочных (AHS) и сверхвысокопрочных (UHS) сталей.

Согласно отчету компании "Автоматизированные системы управления" (Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, FKA, Aachen) за 2016 г., применением высокопрочных сталей и алюминиевых сплавов можно уменьшить массу автомобиля на 8÷36 % при сохранении допустимых изгибной и крутильной жесткостей, предела прочности на разрыв и пере-

мещений при трехточечном изгибе [2].

Рассматриваемое распределение материалов кузова хорошо согласуется с отчетом Центра автомобильных исследований (Center for Automotive Research, CAR) о дорожной карте технологий [3], в котором приведено процентное использование мягких, HS, AHS сталей в конструкции кузова.

В данной статье исследуется уменьшение массы автомобиля внедорожника SUV при удовлетворении целевых показателей краш-теста в соответствии с протоколом Chinese new car assessment (C-NCAP) 2018 [4] и дополнительных требований заказчика по прочности и виброакустике. Целью данной работы является описание методики снижения материалоемкости и массы внедорожника путем топологической, параметрической и многовариантной оптимизаций элементов кузова, марок и толщин их материалов при сохранении существующих ограничений локальной и общей жесткости и прочности и требований безопасности при столкновении.

Существуют различные способы и подходы к снижению массы [5, 6]. Описанные в публикациях решения [7] касаются замены материалов и толщин стенок отдельных узлов конструкции. Необходимое условие успешности подхода к сокращению массы — удовлетворение целевым показателям во время характеристических анализов. Недостатками предложенных решений являются большие временные и финансовые затраты.

В последнее время активно применяется метод топологической оптимизации распределения материала, задача которого — поиск оптимального распределения материала в заданной области для заданных нагрузок и граничных условий, соответствующих определенному набору целевых показателей. В постановке задачи распределения материала в качестве целевых функций используют такие критерии, как условия нагружения, локальные степени свободы, реакции сил, масса или объем конструкции, а в качестве ограничений — объем или массу, напряжения, реакции сил, ограничения компоновки.

Помимо расчетов прочности и жесткости на практике в проразработки проводятся пессе расчеты пассивной безопасности автомобиля и частотный анализ. С использованием SIMРметода (Solid Isotropic Material with Penalisation) для проведения расчетов оптимизируемая область разбивается конечными элементами с переменной плотностью, отражающей процентное соотношение используемого материала в каждом из них. Такой подход позволяет получить концептуальное представление о расположении путей — направлений нагрузки (load paths) в конструкции автомобиля, а целью оптимизации здесь является минимизация взвешенной податливости (weighted compliance) по всем расчетным случаям (load cases) кручения и изгиба.

Крутильную и изгибную жесткости кузова повышают путем модификации расположения усилителей, стоек и лонжеронов в результате изменения их конфигурации, марки и толщины материала, оставаясь в рамках целевых показателей и с учетом естественных ограничений: внутреннего объема салона, дверных и оконных проемов, наличия прочих смежных компонентов. Итоговое распределение плотности и материалов используют для компоновки штампованных усилителей кузова, совмещая их с получившимися путями нагружения.

Концептуальный дизайн компонента далее передается на конструкторскую доработку, где учитываются технологичность, штампуемость, собираемость введенных в конструкцию элементов. Изменения вносятся в конечноэлементную модель, проводится расчетная проверка обновленной конструкции кузова, обеспечивающая повышение крутильной и изгибной жесткости при снижении его массы.

Принципиальная новизна предлагаемого авторами статьи подхода состоит в реализации комплексной стратегии снижения массы кузова автомобиля (BIW - Body in white) путем одновременных изменения топологии и параметрической многовариантной оптимизации конструкции на основе применения платформы CML-Bench^{тм} [цифровая платформа разработки цифровых двойников и система управления деятельностью в области цифрового проектирования, математического моделирования и компьютерного инжиниринга, разработка инжинирингового центра "Центр компьютерного инжиниринга" (CompMechLab®) СПбПУ] и экспертной оценки целевых показателей на всех этапах разработки.

Объектом разработки является цифровой двойник кузова внедорожника SUV. Опыт, получаемый в процессах разработки и краш-тестов, аккумулируется в системах больших данных (Smart Big Data) и закладывает основу для работы интеллектуальных помощников (AI assistants) инженеров-разработчиков. Такая интеллектуализация и автоматизация процесса разработки позволяет выйти на принципиально новый уровень проектирования, учитывать в многоуровневой матрице целей и ограничений проекта до 40 000 целевых показателей и ресурсных ограничений на изделие, создавать решения, выходящие за рамки интуиции главного конструктора.

Поскольку результаты краштеста, анализа виброакустических и прочностных характеристик связаны между собой, рабочий процесс состоял из множества итераций. В ходе каждой итерации исследовалось влияние оптимизированной конструкции кузова на все целевые показатели.

В данной статье основное внимание уделено топологической оптимизации моторного отсека с учетом существующих технических и конструктивных ограничений и описаны пути достижения соответствующих целей с помощью инструментов параметрической оптимизации (более темные области на рисунках).

Методология снижения материалоемкости и массы внедорожника

Достижение основной цели — уменьшения массы кузова на 6÷7 %, должно удовлетворять как структурным требованиям (краштест в соответствии с C-NCAP 2018, виброакустика, прочность), так и техническим ограничениям, таким как невозможность использования легкого материала (алюминиевые сплавы, CFRP) и учет ограничений в силу актуальной компоновки (колеса, двигатель, зона ометания передних

фар, неподвижные, неизменяемые части, фиксированные жесткие точки и т. д.). На рис. 1, a-d представлены некоторые примеры технических ограничений.

Изменения в передке для лучшего поглощения энергии запрещены в силу необходимости удовлетворения требований по защите пешеходов (см. рис. 1, a) и существования ометающей фары. Изменения в переднем подрамнике и фиксированных точках (см. рис. $1, \delta$) для распределения силы также запрещены из-за необходимости удовлетворения компоновочным требованиям. Изменения опор двигателя (см. рис. 1, в) и поперечных сечений передних лонжеронов (см. рис. 1, г) для улучшения деформационного поведения не разрешены в силу компоновочных ограничений. Не допускаются значительные изменения в областях передних колесных арок. Смещение моторного щита для увеличения жизненного пространства запрещено в силу компоновочных требований.

Требования по переднему и боковому ударам включали в себя такие контролируемые параметры, как проникновения, скорости, ускорения. Анализ виброакустических характеристик системы представлял собой модальный анализ и моделирование жесткостей и прочностей определенных зон. Суммарное число контролируемых параметров было ≈80. Изначальная масса кузова составляла 400 кг, цель состояла в снижении массы на 6÷7 % $(24 \div 28 \text{ кг})$. В таблице для примера приведены некоторые контролируемые параметры оптимизации на примере стойки Б (см. рис. 1, ∂).

Для достижения желаемого уменьшения массы проводились одновременно краш-тест, виброакустический и прочностной анализы параллельно с оптимизацией. Поскольку результаты проводимых тестов взаимосвязаны, необходимо было проверять влияние каждого предлагаемого

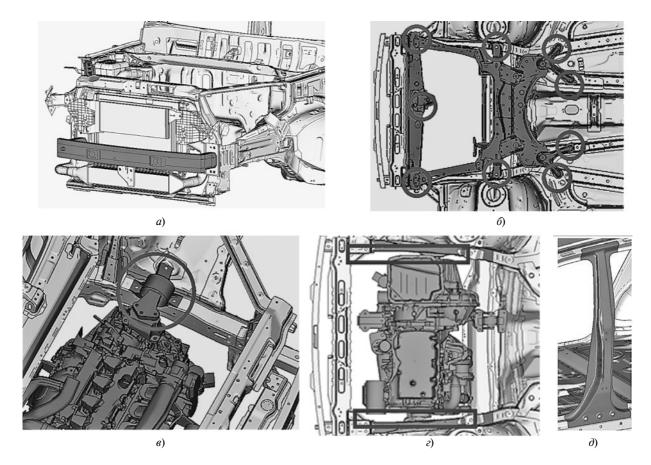


Рис. 1. Примеры технических, стилистических и компоновочных ограничений:

a — передок; δ — передний подрамник и жесткие точки (в кружках); ϵ — опоры двигателя (в кружке); ϵ — поперечные сечения передних лонжеронов (в прямоугольниках), δ — стойка Б

изменения на все расчетные случаи. Для отслеживания истории всех структурных изменений, обзора рабочего процесса и анализа модификаций конструкции кузова была использована SPDM-система (Simulation and Process

Data Management — управление данными и компьютерным моделированием) CML-Bench.

Все конечно-элементные модели, методы моделирования и база материалов были предоставлены заказчиком. Жесткие

Некоторые параметры, контролируемые во время оптимизации

Параметр	Перво- началь- ный проект	СМL- проект	Цель опти- миза- ции	Δ, %
Проникновение в верхушке стойки Б (см. рис. 1, ∂), мм	21,86	7,36	40	-66
Проникновение в верхней части стойки Б, мм	62,21	22,06	90	-65
Проникновение в средней части стойки Б, мм	141,87	59,05	130	—58
Проникновение в нижней части стойки Б, мм	135,95	77,83	130	-43
Проникновение в нижней точке стойки Б, мм	80,54	85,6	100	6
Проникновение передней двери, мм	139,62	107,06	130	-23
Проникновение задней двери, мм	93,52	73,42	130	-21
Скорость проникновения стойки Б, м/с	7,91	7,60	8	-4
Скорость проникновения передней двери, м/с	8,53	7,13	8	-16
Скорость проникновения задней двери, м/с	7,00	6,66	8	— 5

 Π р и м е ч а н и е: Δ — разница параметров между CML-проектом и первоначальным проектом.

манекены, исключенные из общего контакта, были добавлены для корректного распределения массы.

Разработанная высокоадекватная модель (цифровой двойник) кузова внедорожника SUV обеспечивает детальный учет характеристик материалов, совместно используемых в одном изделии, оценку до 10^{12} характеристик этого изделия при погрешности моделирования не более 5 % по каждой из них. "Умные" цифровые двойники позволяют сокращать объемы натурных испытаний при разработке новой продукции в 25 раз, на порядок сокращать сроки разработки. Для разработки "умного" цифрового двойника задавалась многоуровневая матрица целевых показателей и ресурсных ограничений (временных, финансовых, технологических, производственных и т. д.), содержащая порядка 40 000 целевых показателей и требований, предъявляемых к изделию в целом, к его компонентам и деталям в отдельности. В ней предусмотрена возможность оперативного внесения изменений или уточнений как в целевые характеристики, так и в ресурсные ограничения, т. е. возможность "управления изменениями", что обеспечивает непрерывный характер разработки.

При этом в "умном" цифровом двойнике кузова автомобиля учитывается поведение до двухсот различных материалов, среди которых металлы, сплавы, полимеры, композиционные материалы, наконец, метаматериалы с оптимальной микроструктурой. Для корректного описания физикомеханических процессов, проходящих в конструкции при различных воздействиях, например динамических, для каждого материала используется достаточно обширный набор параметров и характеристик, включая кривые упругопластического деформирования при различных скоростях деформирования, критерии начала разрушения, модели его развития, модели накопления повреждений в материалах и т. д. Также учитываются сопряжения элементов конструкции кузова между собой посредством сварных точек и швов, клеевых соединений, для каждого из которых характерна своя модель поведения при различных воздействиях. От расположения сварных соединений значительно зависит поведение конструкции кузова (прочность, вибрации, усталость, долговечность, акустика), а при краш-тестах чрезвычайно важны зоны программируемого разрушения, благодаря чему в определенные моменты времени локально динамически разрушаются строго определенные элементы конструкции в строго определенных зонах таким образом, чтобы обеспечить безопасность пассажиров. Кроме того, "умный" цифровой двойник содержит в себе информацию о каждом узле таких механизмов, как двигатель, подвеска, капот и крышка багажника, стеклоподьемники и т. д., о его кинематических, динамических и прочностных особенностях, позволяя оценить качество функционирования. Вся информация представлена в виде отдельных математических моделей, описываемых нестационарными нелинейными уравнениями в частных производных.

Результаты структурной оптимизации кузова

Натурные испытания требуют чрезвычайно больших затрат, единственным способом минимизировать которые и при этом сократить время вывода автомобиля на рынок является проведение виртуальных испытаний. При создании "умного" цифрового двойника использованы результаты более 1500 виртуальных испытаний, выполненных в автоматизированном режиме. Это позволило, например, запрограммировать разрушение ≈5000÷8000 сварных точек кузова автомобиля при различных вариантах возможных столкновений таким образом, что достигается необходимый высокий уровень пассивной безопасности. При этом нелинейное деформирование и разрушение элементов кузова обеспечивают выживание и минимальную травмируемость водителя и пассажиров. Именно такое нестационарное нелинейное поведение автомобиля и фиксируется в ходе натурного краш-теста. Высокий уровень детализации "умного" цифрового двойника позволяет фактически запрограммировать поведение каждого элемента конструкции в эксплуатационных и аварийных условиях.

Ударное взаимодействие автомобиля с преградами или краштест — быстропротекающий динамический процесс, длительность которого составляет порядка 200÷250 мс. Шаг интегрирования для численного решения задач составляет 1 мкс. Общее число шагов интегрирования более 200 000. Вся эта информация образует большие данные (Smart Big Data) "на входе" (более $2 \cdot 10^{12}$ параметров) "умного" цифрового двойника. Проведенные виртуальные испытания дополняют этот массив, получается Smart Big Data "на выходе". При моделировании процесса длительностью 200 мс на выходе получается массив данных, содержащий более 10¹⁴ параметров. В нескольких десятках миллионов узлов \approx (1÷3)10⁷ регулярно считываются более пятидесяти параметров, таких как перемещения, скорости, ускорения, деформации, напряжения и др. В итоге получается $\approx 5 \cdot 10^8$ кривых, исчерпывающе описывающих поведение "умного" цифрового двойника.

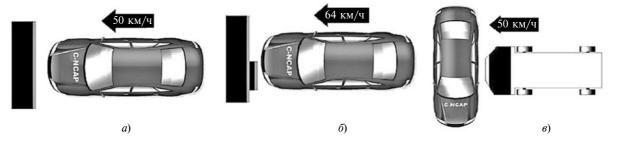


Рис. 2. Общее представление тестов С-NCAP 2018:

a — недеформируемый барьер; δ — смещенный деформируемый барьер; δ — движущийся деформируемый барьер

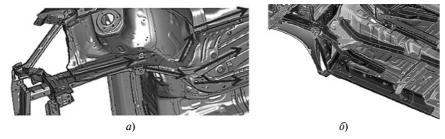


Рис. 3. Распределение силы (стрелки) в области пола (a) и детали из высокопрочных сталей (темные) (b)

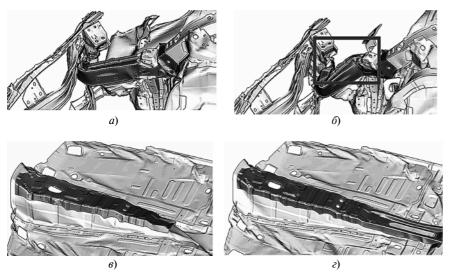


Рис. 4. Различия в поведении изначальных (a и s) и оптимизированных (δ и ϵ) моделей переднего лонжерона (a, δ) и тоннеля (s, ϵ)

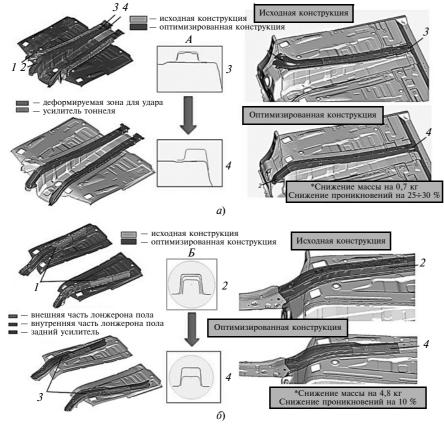


Рис. 5. Примеры структурных изменений в усилителях (а) и лонжеронах (б)

В соответствии с C-NCAP 2018 для оптимизации и повышения производительности рассматривались три расчетных случая (два передних и один боковой удар): фронтальный недеформируемый барьер (FRB), смещенный деформируемый барьер (ODB), движущийся деформируемый барьер (MDB). Общее представление тестов C-NCAP 2018 показано на рис. 2. Краш-тесты проводились с помощью программы конечно-элементного анализа LS-Dyna.

Фронтальный удар о недеформируемый жестко закрепленный барьер (см. рис. 2, a) проводился с начальной скоростью автомобиля 50 км/ч, фронтальный удар о смещенный деформируемый барьер (см. рис. 2, δ) — с начальной скоростью 64 км/ч. Скорость движущегося деформируемого барьера при боковом ударе составляла 50 км/ч (см. рис. 2, δ).

Все модели и результаты были загружены в SPDM-систему CML-Bench. Данная система принципиально отличается от существующих аналогов возможностью оптимизации сразу в нескольких направлениях. По результатам моделирования разрушения при аварии были выявлены "слабые места" в конструкции, которая затем подвергалась многовариантной оптимизации (топология, материал, толщина элементов) при удовлетворении целевому показателю уменьшения массы на $6 \div 7 \%$ ($24 \div 28$ кг) во взаимосвязи с оптимизацией виброакустических и прочностных характеристик.

Улучшение показателей при краш-тесте во многом зависело от компоновочных ограничений и возможности перераспределения силы и энергии деформации по нескольким путям нагрузки для более эффективного энергопоглощения. Некоторые примеры распределения путей нагрузки представлены на рис. 3. На рис. 3, а сила (стрелки) равномерно распределяется от переднего лонжерона в область переднего пола. Другим способом

улучшения результатов с дальнейшим изменением массы было использование высокопрочных сталей. На рис. 3, δ выделены детали с замененными на высокопрочные стали материалами, что привело к лучшему распределению путей нагрузки.

Небольшие изменения в конструкции, особенно в несущих деталях, могут привести к критическим ускорениям и деформациям и, следовательно, значительно снизить безопасность пассажиров. Силы, возникающие в результате воздействия, должны быть направлены к тем деталям, где энергопоглощение может быть максимизировано за короткий промежуток времени. Влияние лонжеронов на результаты краш-теста было исследовано в работе [8]. Передок и передние лонжероны должны разрушаться в определенном направлении, оставляя моторный щит и салон с минимальной деформацией. Во избежание травм ног и головы водителя перемещение руля и педалей также не должно превышать установленные заранее значения.

Баланс между контролируемой деформацией, распределением сил и фиксированными зонами был выдержан с помощью параметрической и многовариантной оптимизаций. На рис. 4 приведены некоторые примеры поведения начальных конструкций и результатов, полученных после оптимизации. На рисунках 4, а, в представлено поведение начальных конструкций соответственно передних лонжеронов и тоннеля. После внесения изменений, полученных с помощью оптимизации (рис. 4, δ , ϵ), проникновения были уменьшены на 10 %.

SPDM-система CML-Bench была использована во время многовариантной оптимизации для руководства процессом разработки и отслеживания результатов. Древообразная структура ветвления решений проекта позволяла отделять и развивать самые перспективные с точки зрения удов-

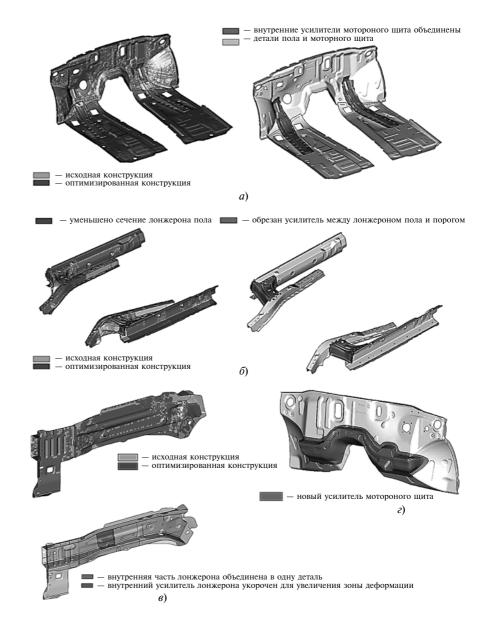


Рис. 6. Оптимизация: внутренних усилителей моторного щита (а); поперечных сечений (б); переднего лонжерона (в) и добавленный усилитель моторного щита (ϵ)

летворения целевым показателям и минимизации массы результаты. Периферические точки ветвления представляют один структурный вариант (материал, толщина), узловые точки ветвления отображают лучшие варианты, которые могут включать в себя множество изменений, показывать лучшие результаты и являться базисами для дальнейших вариантов.

Во время работы было проведено более 700 виртуальных краш-тестов. На рис. 5, 6 представлены примеры изначальных и оптимизированных конструкций. Рис. 5, *а* показывает измене-

ния в усилителях моторного щита (поз. 1, 2) и тоннеля (поз. 3, 4). Усилители 3 тоннеля, состоящие из двух деталей, были объединены в одну деталь 4, как это видно из сечений (см. рис. 5, a, место A). Внесенные изменения привели к уменьшению массы на 0,7 кг и уменьшению проникновений на $25 \div 30$ %. На рис. 5, 6 представлены изменения (поз. 2, 4) в лонжеронах 1, 3 среднего пола (см. место 6). В результате масса была уменьшена на 4,8 кг и проникновения — на 10 %.

На рис. 6, *а* показано, что внутренние усилители моторного щита и пола объединены в один

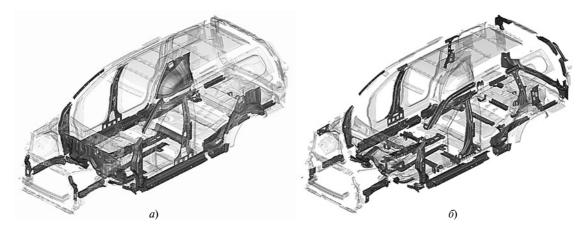


Рис. 7. Все изменения в кузове: a-51 деталь с измененным материалом; $\delta-98$ деталей с измененной толщиной

с каждой стороны. Из рис. 6, *б* видно, что деталь, соединяющая порог и лонжерон, укорочена. Изменения в передних лонжеронах представлены на рис. 6, *в*. Внутренние подкладки лонжерона объединены в одну, внутренний усилитель лонжерона укорочен для увеличения области деформации. На рис. 6, *г* показан добавленный для улучшения показателей фронтального краштеста усилитель моторного щита.

Следующим направлением было снижение массы путем уменьшения толщин элементов, несущих нагрузку.

Параметрическая оптимизация для улучшения показателей краш-теста проводилась в Altair HyperStudy наряду с LS-Dyna для каждой итерации. Для оптимизации были выбраны несущие компоненты с соответствующими толщинами в качестве объектных переменных (шотган, усилитель пола, усилитель тоннеля, усилитель порога, передний лонжерон). В качестве ограничений были взяты параметры проникновения и импульс столкновения. Проверка автомобиля была проведена со смещенным деформируемым барьером ODB. Обобщенные данные по оптимизированным компонентам каркаса, их материалам и толщинам представлены на рис. 7. Таким образом, в кузове у 51 детали были заменены материалы на более

прочные (см. рис. 7, a), у 98 деталей была изменена толщина (см. рис. 7, δ). Все представленные изменения получены с помощью SPDM-системы CML-Bench.

Выводы

В результате оптимизации конструкции кузова с учетом всех технологических ограничений стали HS и AHS составили 23 % от всей массы кузова. После всех циклов оптимизации и выполнения краш-тестов, анализа виброакустических и прочностных характеристик (более 1500 расчетных вариантов) выбранная стратегия уменьшения массы обеспечила выполнение всех требований заказчика наряду с уменьшением массы на 30 кг (7,5 %), что даже превысило предварительные ожидания. Среднее улучшение результатов краш-тестов с точки зрения смещений внутрь салона составило около 30 %.

В силу временных рамок, технологических ограничений и целевых показателей дальнейшие действия по уменьшению массы не оправдывали временных затрат и вычислительных ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Miltenović A., Banić M., Miltenović V.** Role and importance of lightweight design in the product devel-

opment // University of East Sarajevo, faculty of mechanical engineering, Conference on mechanical engineering technologies and applications. December, 2014. P. 529—538.

- 2. **Communication** Module Mass Reduction: Final Report / R. Wohlecker, R. Henn, H. Wallentowiz, J. Leyers // FKA, Body Department. Aachen, November, 2016.
- 3. **Technology Roadmaps:** Intelligent Mobility Technology, Materials and Manufacturing Processes, and Light Duty Vehicle Propulsion / B. Smith, A. Spulber, S. Modi, T. Fiorelli // Center for Automotive Research, Ann Arbor, MI. June 2017, 27 p.
- 4. **C-NCAP Management Regulation** (2018 Edition) China Automotive Technology and Research Center, 222 p.
- 5. Rajasekaran Mohan, Hari Ram V., Subramanian M. On Vehicle Frontal Crash New mass optimization technique to achieve low mass BIW designs using optimal material layout methodology on the frontal vehicle crash // Journal of Mechanical Science and Technology. December, 2016. V. 30. Issue 12. P. 5617—5623.
- 6. **Multi-objective optimization** of a vehicle body by combining gradient-based methods and vehicle concept modelling / G. De Gaetanoa, D. Mundoa, C. Malettaa et al. // Journal Case Studies in Mechanical Systems and Signal Processing. July, 2015. V. 1. P. 1—7.
- 7. **Design of lightweight** magnesium car body structure under crash and vibration constraints / M. Kiani, I. Gandikota, M. Rais-Rohani, K. Motoyama // Journal of Magnesium and Alloys. V. 2. Issue 2. June, 2014. P. 99—108.
- 8. **Shen Z., Qiao X., Chen H.** BIW Safety Performance Research Based on Vehicle Frontal Crash // Brilliance Automotive Engineering Research Institute. Shenyang, China. 2013. P. 13—26.

Ю. О. ПРИСТИНСКИЙ, Н. Ю. ПЕРЕТЯГИН, Е. В. КУЗНЕЦОВА, П. Ю. ПЕРЕТЯГИН, канд. техн. наук (МГТУ "СТАНКИН"), e-mail: y.pristinskiy@stankm.ru

Сравнение механических свойств твердых сплавов ВК6, полученных традиционным методом и искровым плазменным спеканием¹

Предложено для получения сплава WC—Со использовать искровое плазменное спекание (ИПС) под давлением. Исследовано влияние режимов ИПС на структуру и механические свойства сплава. Показано, что композиты, полученные методом ИПС, обладают повышенными механическими свойствами по сравнению композитами, изготовленными горячим прессованием.

Ключевые слова: искровое плазменное спекание, твердый сплав, твердость, трещиностойкость, инструментальный материал.

It is proposed to use a spark plasma sintering (SPS) under pressure for the production of a WC—Co alloy. The effect of the SPS regimes on the structure and mechanical properties of the alloy is studied. It is shown, that composites obtained by the SPS method have enhanced mechanical properties compared to composites produced by hot pressing.

Keywords: spark plasma sintering, hard alloy, hardness, crack resistance, tool material.

В настоящее время твердый сплав карбида вольфрама (WC) с кобальтом (Co) является широко распространенным инструментальным материалом [1], который нашел применение в различных отраслях промышленности (нефтяная, горнодобывающая, машиностроение) [2, 3]. Благодаря наличию в структуре тугоплавких карбидов твердосплавный материал обладает высокими твердостью и теплостойкостью. Однако данный сплав имеет низкую прочность и плохо сопротивляется хрупкому разрушению [4]. Увеличение количества фракции карбида вольфрама с одновременным уменьшением роста зерен при спекании может значительно повысить твердость и износостойкость сплава. Поэтому для улучшения трещиностойкости необходимо увеличить содержание кобальта [5-7]. Оптимальным балансом твердости и трещиностойкости обладают материалы с содержанием кобальта $5 \div 10$ мас. % [8], которые используют для изготовления режущих пластин.

Для повышения эксплуатационных свойств режущих пластин из твердого сплава необходимы новые методы спекания и технологии приготовления порошков.

В настоящее время заготовки для твердосплавных режущих пластин изготовляют горячим прессованием [9, 10]. Однако данная технология спекания имеет ряд существенных недостатков: долгий технологический цикл вследствие низкой скорости нагревания; высокая стоимость оснастки и оборудования. Поэтому рассматривается использование для этих целей искровое плазменное спекание (ИПС) [11, 12].

Особенность новой технологии спекания заключается в следующем. Через порошковый материал, предварительно запрессованный в графитовую пресс-форму, пропускают импульсный электрический ток при одновременном одноосном сжатии [13, 14]. Технология ИПС позволяет нагревать материал с очень высокой скоростью (>1000 °С/мин), т. е. спекание происходит за несколько минут, при этом сохраняется исходная структура материала без аномального роста зерен [15].

Проведены эксперименты по спеканию твердого сплава WC—Co (6 % Co), определены оптимальные режимы спекания, повышающие физико-механические свойства спеченных образцов. Установлены зависимости влияния режимов спекания на механические свойства вольфрамокобальтового твердого сплава.

В работе использовали коммерческий субмикронный порошок WC—Co (производитель Plasmotherm, Москва). Исходный размер частиц карбида вольфрама составлял не более 1,5 мкм, средний размер частиц кобальта — 40 нм.

Порошок спекали на установке искрового плазменного спекания КСЕ-FСТ-H-HP-D25-SD (производитель FCT Systeme GmbH, Германия). Для определения оптимального процесса спекания были выбраны следующие режимы: температуру варьировали в диапазоне $1000 \div 1500$ °C с шагом 50 °C; скорость нагревания 100 °C/мин; давление и время выдержки при максимальной температуре соответственно p=30 МПа и $t_{\rm B}=5$ мин.

Известно, что механические свойства материала также зависят от времени выдержки и давления при максимальной температуре спекания [16]. Поэтому время выдержки увеличили до 10 мин, а дав-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ по Соглашению № 074-11-2018-011 от 31.05.2018 "Разработка и организация высокотехнологичного производства инновационных комплексов электрического обогрева межотраслевого применения с прорывными эксплуатационными характеристиками" в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 от 09.04.2010.

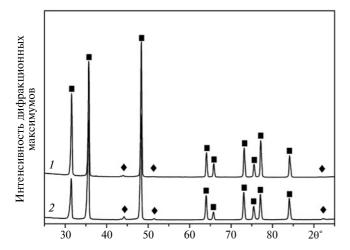


Рис. 1. Дифрактограммы исходного порошка (1) и спеченного образца (2)

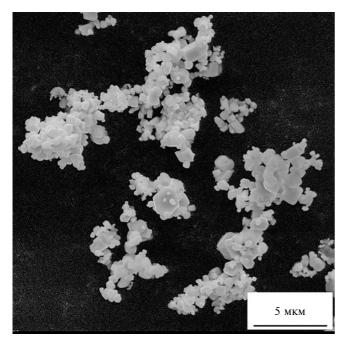


Рис. 2. СЭМ исходного порошка

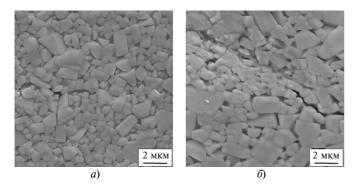


Рис. 3. СЭМ полированных и термически протравленных образцов WC, полученных методом ИПС (a) и горячим прессованием (δ)

ление варьировали от 30 до 80 МПа. Спеченные образцы имели диаметр 20 мм и высоту 5 мм.

Рентгеновскую съемку исходного порошка и спеченных образцов выполняли на рентгеновском дифрактометре Empyrean (PANalytical, Нидерланды; Си-К α спектр, длина волны 1,5405981 Å, напряжение 60 кВ, сила тока луча 30 мА) угол 2 θ съемки изменяли от 25 до 100° с шагом 0,05.

Плотность порошка WC—Co измеряли на гелиевом пикнометре AccuPyc II 1340 (Micromeritics, CIIIA).

Морфологию исходного порошка и спеченных образцов изучали с помощью сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMH (Tescan, Чехия). Спеченные образцы полировали на шлифовальнополировальной машине Tegramin-30 (Struers ApS, Дания) с использованием алмазных дисков с добавлением суспензий с синтетическими алмазами зернистостью от 9 до 1 мкм.

Плотность спеченных образцов измеряли методом Архимеда в дистиллированной воде.

Твердость HV и трещиностойкость (критический коэффициент K_{1c} интенсивности напряжений) измеряли методом индентирования пирамидой Виккерса на универсальном микротвердомере Qness Q10A (Qness GmbH, Австрия).

Твердость и трещиностойкость определяли по десяти отпечаткам на каждом образце с нагрузками 10 и 100 Н. В обоих случаях время выдержки под нагрузкой составляло 10 с. Для измерения диагоналей отпечатков и образовавшихся трещин использовали СЭМ-микроскоп. Формулы для расчета твердости и трещиностойкости приведены в работе [17].

На рис. 1 приведены дифрактограммы исходного порошка I и образца 2, спеченного при температуре 1300 °C с выдержкой $t_{\rm B}=10$ мин, давление при максимальной температуре спекания составляло p=80 МПа. Видно, что и в исходном, и в спеченном материалах присутствуют характерные для твердого сплава фазы карбида вольфрама и кобальта.

Получены СЭМ исходного порошка (рис. 2) и термически протравленная микроструктура спеченного материала ВК6 (рис. 3, a). Видно, что зерна одинакового размера (0,7÷0,8 мкм). В микроструктуре остаточная пористость не обнаружена.

Микроструктура сплава ВК6, спеченного методом горячего прессования, показана на рис. 3, δ , размеры зерен $2\div 2,2$ мкм.

Зависимость твердости спеченных образцов WC—Со от температуры спекания представлена на рис. 4. Максимальная твердость (17,3 ГПа) образцов была зафиксирована при температуре спекания T = 1300 °C. При дальнейшем повышении температуры твердость не изменялась.

На рис. 5 показана зависимость изменения относительной плотности р (относительно теорети-

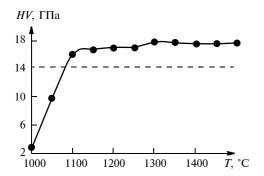


Рис. 4. Зависимость изменения твердости HV полученных образцов от температуры T спекания (штриховая линия — твердость стандартного промышленного образца BK6)

ческой, которая составляет 15 г/см 3) от температуры T спекания.

Плотность спеченных при температуре T = 1300 °C образцов WC—Со была близка к теоретическим значениям.

Получена зависимость изменения трещиностойкости (коэффициент K_{1c}) получаемых образцов от температуры T спекания (рис. 6)

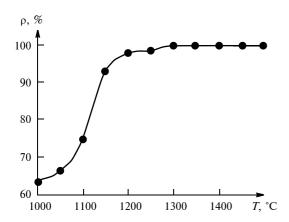


Рис. 5. Зависимость изменения относительной плотности ρ образцов от температуры T спекания

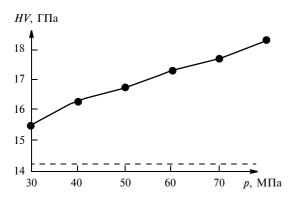


Рис. 7. Зависимости изменения твердости HV получаемых образцов от давления p при T=1300 °C и $t_{\rm B}=10$ мин (штриховая линия — твердость стандартного промышленного образца ${\rm BK6})$

Максимальная трещиностойкость (K_{1c} = 10 МПа·м^{1/2}) образцов достигается при T = 1300 °C. При дальнейшем повышении температуры происходит снижение данного показателя вследствие роста зерен.

Экспериментальные зависимости, представленные на рис. 4—6, получены при постоянном давление $p=30\,\mathrm{M}\Pi a$ и времени выдержки $t_\mathrm{B}=5\,\mathrm{m}$ ин.

На рис. 7 и 8 представлены зависимости изменения твердости HV и показателя трещиностойкости (коэффициент K_{1c}) от приложенного при спекании давления р при $T=1300~^{\circ}C$. Максимальное давление р в экспериментах ограничивалось возможностью разрушения графитовой матрицы.

Установлено, что максимальные твердость и трещиностойкость достигаются при $p=80~\mathrm{M}\Pi a$. Повышение механических свойств спеченного материала объясняется повышением числа контактов между частицами порошка при повышении давления.

На рис. 9 показана трещина на поверхности спеченного образца, полученная при индентировании, которая проходит не по зернам карбида вольфра-

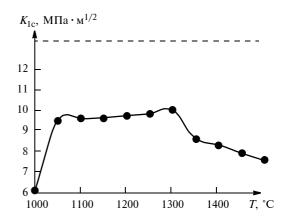


Рис. 6. Зависимость изменения коэффициента K_{1c} (трещиностойкости) полученных образцов от температуры T спекания (штриховая линия — трещиностойкость стандартного промышленного образца BK6)

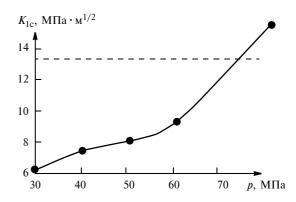


Рис. 8. Зависимость изменения коэффициента K_{1c} для полученных образцов от давления p при T=1300 °C и $t_{B}=10$ мин (штриховая линия — коэффициента K_{1c} для стандартного промышленного образца ВК6)

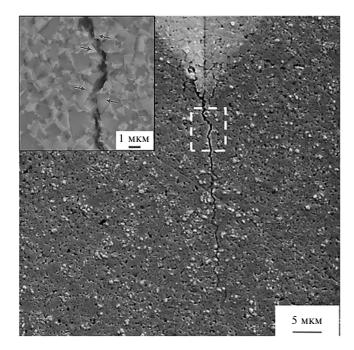


Рис. 9. Трещина на поверхности спеченного образца, полученная при индентировании

ма, а по кобальтовой связке, так как кобальт пластичнее карбида вольфрама. Поэтому равномерное распределение кобальта не только обеспечивает связки между зернами WC, но и предотвращает распространение трещин и хрупкое разрушение материала.

Кроме того, рентгенофазовый анализ (см. рис. 1) спеченных образцов указывает на отсутствие η - и θ -фаз, которые снижают твердость и трещиностой-кость материала [18].

Таким образом, установлен оптимальный режим искрового плазменного спекания: T = 1300 °C, p = 80 МПа, $t_{\rm B} = 10$ мин, который обеспечивает получение образцов твердого сплава ВК6 с повышенными механическими свойствами. По сравнению с промышленным твердым сплавом ВК6 образцы, полученные по новой технологии, показали повышение твердости на 29 % и трещиностойкости на 17 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Siwak P., Garbiec D.** Microstructure and mechanical properties of WC—Co, WC—Co—Cr₃C₂ and WC—Co—TaC cermets fabricated by spark plasma sintering // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2016. N. 26. P. 2641.
- 2. **Shao G. Q., Duan X. L., Xie J. R.** Sintering of nanocrystalline WC—Co composite powder // Reviews on advanced materials science. 2003. N. 5 (4). P. 281.
- 3. **Исследование** влияния добавления оксида графена на микроструктуру, механические свойства и электропроводность оксидной керамики ZrO₂, полученной методом искрового плазменного спекания / Н. Ю. Перетягин, А. Смирнов, Е. В. Кузнецова и др. // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 4 (47). С. 76—80.

- 4. **Козочкин М. П., Солис Н. В., Пинарготе Н. В.** Исследование эффектов вибрационного точения с применением СОТС // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 67—73.
- 5. **Исследование** влияния методов подготовки порошков оксида алюминия и оксида графена на механические и электрические свойства нанокомпозита, полученного искровым плазменным спеканием / П. В. Фокин, Н. В. Солис, Е. В. Кузнецова и др. // Перспективные материалы. 2018. № 1. С. 74—82.
- 6. **Microstructure**, mechanical properties and low temperature degradation resistance of 2Y-TZP ceramic materials derived from nanopowders prepared by laser vaporization / A. Smirnov, H. D. Kurland, J. Grabow an. ot. // Journal of the European Ceramic Society. 2015. Vol. 35. P. 2685—2691.
- 7. **Маслов А. Р., Пристинский Ю. О., Смирнов А.** Характеристики инновационных режущих материалов, полученных методом искрового плазменного спекания // Вестник МГТУ "Станкин". 2017. № 2 (41). С. 52—55.
- 8. **Разработка** цельных концевых фрез из режущей керамики для обработки заготовок из труднообрабатываемых материалов / С. Н. Григорьев, В. А. Гречишников, М. А. Волосова и др. // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 4 (47), С. 87—93.
- 9. **Molodtsov V. V., Okunkova A. A., Peretyagin P. Y.** Manufacture of graphite electrodes for the electrospark machining of complex high-precision components // Russian Engineering Research. 2012. Vol. 32. Is. 7, 8. P. 550—552.
- 10. **Effect** of TiC addition on the mechanical behaviour of $A1_2O_3$ —SiC whiskers composites obtained by SPS / C. F. Gutierrez-Gonzalez, S. S. Pozhidaev, P. Peretyagin an. ot. // Journal of the European Ceramic Society. 2016. N. 36. P. 2149.
- 11. **Spark** plasma sintering of electro conductive nanocomposite Al_2O_3 —SiCw—TiC / S. S. Pozhidaev, A. E. Seleznev, N. W. Solis Pinargote, P. Y. Peretyagin. Mechanics & Industry. 2015. N. 16. P. 710.
- 12. **Spark** plasma sintering of zirconia/nano-nickel composites / C. F. Gutierrez-Gonzalez, N. W. Solis Pinargote, Y. Peretyagin P an. ot. // Mechanics & Industry. 2015. N. 16. P. 703.
- 13. **Electrically** conductor black zirconia ceramic by SPS using graphene oxide / N. W. Solis, P. Peretyagin, R. Torrecillas an. ot. // Journal of Electroceramics. 2017. N. 38. P. 119.
- 14. **Sintering** of Cutting Plates / D. I. Yushin, N. Solis Pinargote, P. Yu. Peretyagin et ot. // Russian Engineering Research. 2016. N. 36. P. 410.
- 15. **Волосова М. А., Гурин В. Д., Селезнев А. Е.** Моделирование силовых параметров при торцевом фрезеровании закаленной стали инструментом с керамической режущей частью // Вестник МГТУ "Станкин". 2015. № 4 (35). С. 30—35.
- 16. **Tribological** behavior of a 3Y-TZP/Ta ceramic-metal biocomposite against ultrahigh molecular weight polyethylene (UHWPE) / A. Smirnov, M. Volosova, P. Peretyagin, J. F. Bartolome // Ceramics International. 2018. Vol. 44. Is. 2. P. 1404—1410.
- 17. **Mechanical** properties and low temperature degradation resistance of 2Y-TZP ceramic materials derived from nanopowders prepared by laser vaporization / A. Smirnov, H. D. Kurland, J. Grabow an. ot. // Journal of the European Ceramic Society. 2015. N. 35. P. 2685.
- 18. **Исследование** влияния добавления оксида графена на микроструктуру, механические свойства и электропроводность оксидной керамики ZrO₂, полученной методом искрового плазменного спекания / Н. Ю. Перетяган, А. Смирнов, Е. В. Кузнецова и др. // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 4 (47). С. 76—80.

П. П. ШАРИН, М. П. АКИМОВА, С. П. ЯКОВЛЕВА, А. М. БОЛЬШАКОВ, (Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск), В. И. ПОПОВ (Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова СО РАН), e-mail: Psharinl960@mail.ru

Структура и прочность переходной зоны при твердофазном термически активируемом контактном взаимодействии алмаза с железом и титаном

Изучены особенности промежуточных слоев, образованных при контакте алмаза с активными к углероду металлами — железом и титаном с нагреванием в режиме работы вакуумной печи, который используется при спекании с пропиткой медью твердосплавных матриц алмазных инструментов. Результаты можно использовать при разработке составов и технологий, обеспечивающих высокое алмазоудержание в матрицах инструментального материала на основе порошковых вольфрамо-кобальтовых твердосплавных смесей.

Ключевые слова: контактное взаимодействие, алмаз, железо, титан, переходная зона, графит, металлокарбидное покрытие, прочность.

The features of intermediate layers formed by the contact of a diamond with carbon-active metals — iron and titanium, with heating in the operating mode of a vacuum furnace, which is used during sintering of copper-impregnated diamond tools with copper, are studied. The results can be used in the development of compositions and technologies that provide high diamond content in the matrices of tool material based on powdered tungsten-cobalt hard alloy mixtures.

Keywords: contact interaction, diamond, iron, titanium, transition zone, graphite, metal carbide coating, strength.

Повышение производительности при бурении скважин и шурфов, проходке и обработке абразивных материалов связано с повышением силовых нагрузок на алмазный инструмент и скоростных режимов, что существенно снижает их ресурс и требует совершенствования существующих инструментов и разработок новых. Стойкость и работоспособность алмазных инструментов зависит от качества алмазного сырья и физико-механических свойств, учитывающих свойства алмазов и обеспечивающих высокую адгезию матрицы к алмазам, для прочного и надежного закрепления их в матрице [1-4]. Такими свойствами обладают металломатричные композиты, содержащие химически активные к алмазу металлы переходной группы [4—10].

Поэтому при создании новых высокоадгезионных к алмазу составов металломатричных композитов и при разработке технологии их получения важно изучить особенности контактного взаимодействия алмаза с адгезионно-активными металлами при разных температурных режимах. В работах [11—17] обобщен экспериментальный материал о контактном взаимодействии поверхности алмаза с металлами при высоких температурах в вакууме, включая химически активные к алмазу карбидообразующие металлы: Co, Ni, Ti, Cr, Mn, Nb, Mo и W. Анализ материалов по данной проблеме показал, что некоторые важные аспекты термически активируемого контактного взаимодействия алмаза с железом и титаном до конца не изучены. Например, формирование

структурно-фазового состояния и механических свойств поверхностных слоев, образующихся на межфазных границах алмаз—металл при сравнительно низкой температуре нагревания контактных пар в вакууме относительно температур плавления металлов.

Цель настоящей работы изучение взаимосвязей фазового состава, микроструктуры и прочности переходной зоны, сформированной в процессе твердофазного взаимодействия алмаза с железом и титаном при нагревании и охлаждении в вакууме, что соответствует температурным режимам работы вакуумной печи при спекании с пропиткой медью инструмента с вольфрамкобальтовой матрицей. Таким образом, необходимо определить наиболее эффективный адгезионно-активный металл, т. е. добавку к вольфрамкобальтовой матрице, обеспечивающую при спекании с пропиткой медью химическое сцепление алмаза с матрицей инструмента, без увязки к конкретной схеме или температурно-временному режиму нагревания.

Эксперименты и методы исследований

Для получения контактных пар алмаз-металл использовали кристаллы природного алмаза и спрессованные в форме таблеток порошки железа ПЖВЧм.71.28 (ГОСТ 9849—86) и титана ПТЭС-1 (ТУ 48-10-22-85). Спрессованные таблетки высотой 4 мм были получены под давлением 45÷75 МПа в пресс-формах диаметром 6 мм. Кристаллы природного алмаза представляли собой круглые бриллианты с семнадцатью гранями, ограненные и отполированные в заводских условиях (сертифицированные бриллианты: Кр-17, группа 4/2 и 4/3). Масса ограненных алмазов составляла ≈ 0.01 карат, диаметр по рундисту — $1,60 \div 0,015$ мм. Кристаллы прозрачны, имели слегка желтоватый оттенок.

Методика приготовления и получение соединений алмаз-металл путем нагревания в камере вакуумной печи СНВЭ-1.3.1/16И4 описаны в работе [13]. При нагревании обоих образцов "алмаз металлическая таблетка" прикладывали одинаковую нагрузку F = 0,172 Н. Нагревание образцов осуществляли при таком же режиме, что и в работе [13], т. е. циклограмма нагревания вакуумной печи соответствовала режиму при спекании с пропиткой медью алмазоносной матрицы на основе вольфрамкобальтовой порошковой смеси ВК. На начальном этапе нагревания образцов дважды медленно поднимали температуру: сначала до 600 °C в течение 60 мин с выдержкой 25÷30 мин при этой температуре, затем до 900 °C в течение 60 мин с выдержкой при этой температуре в течение 25÷30 мин. На завершающем этапе нагревания в течение 45÷60 мин температуру поднимали до T = 1090 °C (максимальная). После 5 мин выдержки при максимальной температуре печь выключали, температура снижалась в режиме свободного охлаждения печи. Вакуумная система печи в холодном состоянии обеспечивала в камере предельное остаточное давление $6 \cdot 10^{-3}$ Па. При максимальной температуре нагревания, которая соответствовала температуре плавления меди, остаточное давление в вакуумной камере составляло ≈1,1 Па.

Спекшиеся образцы "алмаз — металлическая таблетка" подвергали разъединению методом сдвига с помощью специального устройства [13]. При этом фиксировали усилие, необходимое для разрушения, и определяли прочность соединения [13]. Поверхности, образовавшиеся после разъединения образцов, изучали методами растровой электронной микроскопии (РЭМ), рентгеноспектрального микроанализа, рентгенофазового анализа и рамановской спектроскопии. Мик-

роструктура и химический состав изучали на приборах JEOL JSM-6480LV и HITACHI-TM3030, оснащенных энергодисперсионными спектрометрами. Рентгенофазовый анализ выполняли на дифрактометре Bruker D8 Discover в немонохроматизированном CuK_{α} -излучении ($\lambda = 1,5406 \text{ Å}$) при ускоряющем напряжении 40 кВ и анодном токе 40 мА. Для обработки спектров использовали программу DIFFRAC^{Plus}. При фазовом анализе использовали стандартную библиотеку ICDD PDF-2 release 2007.

Аллотропные модификации углерода (алмаз, графит) на поверхности алмаза и металлической таблетки идентифицировали по рамановскому спектру (комбинационное рассеяние), а их расположение или локализацию на участках изучаемой поверхности определяли картированием изображений рамановских спектров. Для съемок рамановских спектров использовали измерительный комплекс NT-MDT INTEGRA Spectra, который включает в себя сканирующий рамановский спектрометр и конфокальный оптический микроскоп. Методика измерений рамановских спектров и их картирование приведены в работе [13]. Микротвердость металлических таблеток после отрыва алмаза измеряли на приборе ПМТ-3 при нагрузке F = 0.49 H. Микротвердость измеряли на участках таблеток, которые при нагревании имели непосредственный контакт с поверхностью алмаза и на участках, не соприкасавшихся при нагревании с алмазом. Значения усредняли по пяти измерениям.

Результаты эксперимента

Контактная пара алмаз—же**лезо.** На рис. 1 показаны контактные поверхности образцов алмаза и таблетки железа после их разъединения с помощью РЭМ и карты распределения на них химических элементов. Усилие, зафиксированное при разъединении кристалла алмаза с таблеткой железа, составило 15,00 Н, что при площади контакта, равной площади бриллианта $6.22 \cdot 10^{-7}$ м², соответствует прочности соединения образцов (24,12 МПа). Прочность соединения алмаз хром, полученного при таких же условиях, составила 6,76 МПа [13]. Поверхность таблетки железа, имевшая при нагревании непосредственный контакт с алмазом, заметно отличается от остальной поверхности таблетки: в зоне контакта проявляются следы термохимического взаимодействия и диффузионных процессов. РЭМ (см. рис. 1, а) и карта распределения железа (см. рис. 1, в) показали, что поверхность алмаза, контактирующая при нагревании с железом, подверглась металлизации с образованием покрытия. Рентгенофазовый анализ поверхности алмаза показал присутствие на нем фаз железа, карбида железа (Fe₃C), алмаза и графита (табл. 1). По-

Таблица 1 Фазовый состав поверхностей раздела "алмаз — таблетка железа"

Фаза	Пространственная группа симметрии	Параметры решетки, нм	Кристалл алмаза	Таблетка железа
С (алмаз)	Fd-3m	a = 0.3566	+	+
С (графит)	P63/mmc	a = 0,2464 c = 0,6736	+	+
Fe	Im-3m	a = 0.2866	+	+
Fe ₃ C	Pbnm	a = 0,4514 b = 0,5078 c = 0,6729	+	+
Fe ₂ O ₃	R-3c	a = 0,5028 b = 1,3730	_	+

верхность таблетки и в зоне контакта с алмазом, и вне этой зоны имеют пористую структуру, состоящую из припекшихся друг с другом зерен металла. Средние микротвердости в этих зонах отличаются: в зоне контакта с алмазом микротвердость составила $1177 \pm 34 \ \mathrm{M\Pia}$, вне этой зоны — $1549 \pm 39 \ \mathrm{M\Pia}$.

Разъединение спекшихся образцов произошло исключительно по границе "металлизированное покрытие — поверхность таблетки железа" (см. рис. 1, *a*, б) и по кристаллу алмаза вследствие его разрушения путем транскристаллитным сколом. Ни одного участка на поверхностях раздела образцов, где имело бы место их разъединение по межфазной границе "алмаз — металлизированное покрытие", не обнаружено. Это указывает на прочное сцепление металлизированного покрытия с алмазом в результате их термохимического адгезионного взаимодействия. Кроме крупного фрагмента алмаза, отколовшегося от центральной части площадки кристалла алмаза, имеются более десяти мелких фрагментов, отколовшихся от кристалла алмаза при разъединении спекшихся образцов. Они видны (см. рис. 1, a, δ) как темные участки разных форм и размеров, беспорядочно расположенные на периферийной зоне поверхности кристалла алмаза. Они однозначно идентифицированы как алмазы по характерному узкому пику на частоте 1332 см^{-1} в спектре комбинационного рассеяния при изучении рамановским спектрометром. Причем все отколовшиеся фрагменты кристалла алмаза вместе с металлизированным покрытием перенесены на таблетку железа (см. рис. 1, б). Таким образом, на этих участках сцепление алмаза с металлизированным покрытием и сцепление металлизированного покрытия с таблеткой железа были настолько прочными, что разрыв спекшихся образцов произошел по крис-

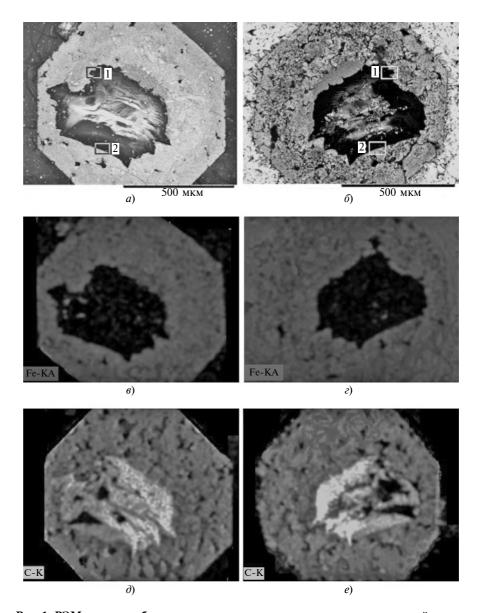


Рис. 1. РЭМ в режиме обратнорассеянных электронов контактных поверхностей алмаза (a) и таблетки железа (b) после их разъединения, карты распределения химических элементов на поверхности алмаза (a, ∂) и таблетки железа (c, e)

таллу алмаза вследствие его разрушения.

На рис. 2 показаны РЭМ и трехмерные карты рамановских спектров алмаза и графита на прямоугольных участках поверхности кристалла алмаза $(a, \varepsilon, \partial)$ и таблетки железа $(\delta, \varepsilon, \varkappa)$, выделенных на рис. $1, a, \delta$ (поз. 1). На РЭМ поверхности алмаза (см. рис. 2, a) видны транскристаллитные сколы алмаза и структуры металлизированного покрытия. Ступенчатые изломы алмаза указывают на спайность кристалла. Поверхность металлизированного покрытия имеет относиванного покрытия имеет относи-

тельно однородную мелкозернистую структуру, состоящую из трех фаз, которые при рентгенофазовом анализе идентифицированы как карбид железа, железо и графит (табл. 1). Образования графита видны в виде локальных темных участков, которые прерываются спекшимися карбидными зернами (светлые участки). На картах рамановских спектров (см. рис. 2, ∂ , e) видно, что графит на поверхности металлизированного покрытия алмаза находится в виде локальных прерывистых образований, которые не образуют на поверхности покрытия

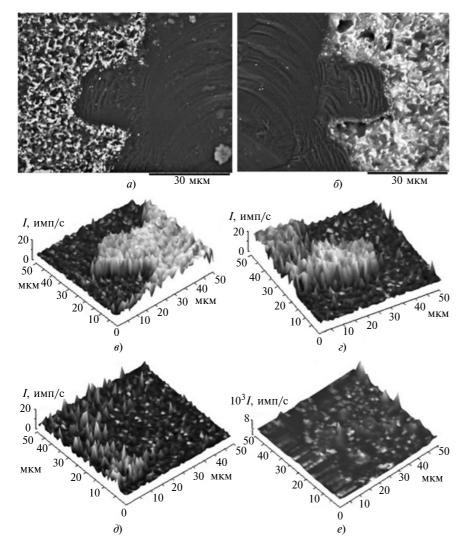


Рис. 2. РЭМ поверхностей алмаза (a) и таблетки (δ), трехмерные карты рамановских спектров алмаза (a, c) и графитовых образований (∂ , e) на прямоугольном участке поверхности раздела образцов (см. рис. 1, a, δ , поз. I)

сплошного слоя. На поверхности таблетки графита их существенно меньше, здесь углерод, видимо, в основном находится в связанном состоянии. На рис. 3 показано РЭМ излома переходной зоны "алмаз — таблетка железа" на прямоугольном участке (см. рис. 1, поз. 2). При большом увеличении на

РЭМ в режиме вторичных электронов отчетливо просматривается очертание поверхности кристалла алмаза, сопряженного с металлизированным покрытием и микроструктуры металлизированного покрытия и приповерхностного слоя таблетки железа. Полированная до наношероховатости исходная поверхность алмаза (площадка бриллианта), имеющая идеально гладкий контур, повреждена (протравлена) и стала рельефной. При этом металлизированное покрытие плотно сопряжено с поверхностью алмаза: на межфазной границе "алмаз — металлизированное покрытие" полностью отсутствуют микрополости и микропустоты. На РЭМ в режиме обратнорассеянных электронов (см. рис. 3, δ) четко видны расположения и формы зерен карбида железа (светлые зерна), которые вытянуты параллельно поверхности кристалла алмаза. Металлизированное покрытие в отличие от приповерхностного слоя таблетки железа, в котором размер спекшихся зерен составляет 50 мкм и более, характеризуется мелкозернистой структурой — максимальные размеры зерен фазовых составляющих элементов не превышают 1 мкм. Это в совокупности с рентгенофазовым анализом (см. табл. 1) дает основание для предположения о химическом сцеплении металлизированного покрытия с алмазом: на границе с алмазом образуются зоны карбида железа, которые плавно перехо-

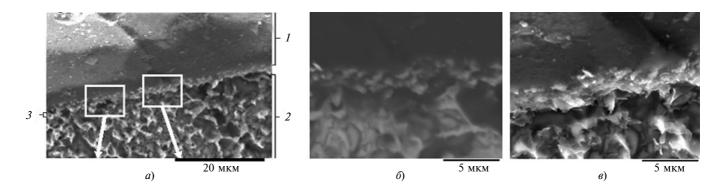


Рис. 3. Зона контакта алмаза и таблетки железа в режиме обратнорассеянных электронов и вторичных электронов: 1- алмаз; 2- таблетка железа; 3- переходная зона

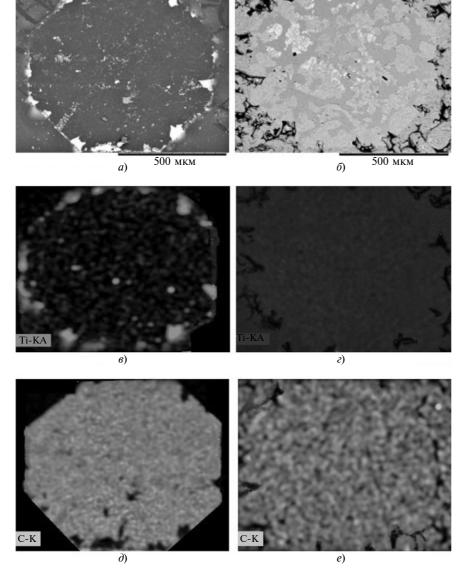


Рис. 4. РЭМ в режиме обратнорассеянных электронов контактных поверхностей алмаза (а) и таблетки титана (б) после разъединения, карты распределения химических элементов на поверхности алмаза (e, ∂) и таблетки титана (e, e)

дят в твердый раствор углерода в металле. Средняя толщина металлизированного покрытия составила 1 мкм.

Контактная пара алмаз-ти**тан.** На рис. 4 показаны контактные поверхности образцов алмаза и таблетки титана, полученные с помощью РЭМ после их разъединения, а также карты распределения на них химических элементов. Разъединение контактной пары произошло по границе поверхности алмаза. Прочность сцепления контактных образцов была низкой, так как разъединение произошло от небольшого

усилия, которое не удалось зафиксировать и измерить.

На поверхности алмаза имеются лишь небольшие локальные участки, где видны тонкие металлизированные слои (см. рис. 4, a-e), расположенные в основном по краям шестиугольной площадки кристалла. При разъединении образцов эти участки металлизированного слоя остались закрепленными на поверхности алмаза. Это указывает на то, что в результате термохимического адгезионного взаимодействия прочность сцепления металлизированных слоев с алмазом на этих участках превышала прочность их сцепления с таблеткой титана. На алмазе по всей площади, соприкасавшейся при термообработке с таблеткой титана, имеются участки со следами разрушения и травления вследствие каталитической графитизации его поверхности под воздействием остаточного кислорода, содержащегося в камере вакуумной печи, и титана. Участки следов разрушения и травления имеют разные формы и размеры. На этих участках исходно ровная поверхность кристалла протравлена и стала шероховатой. Кроме этих участков со следами разрушения и травления на поверхности алмаза имеются участки 1 (рис. 5), в которых сохранились исходные гладкие и ровные поверхности кристаллов. Рентгенофазовый анализ поверхности алмаза показал наличие фаз карбидов титана и титана (табл. 2). На поверхности спрессованного титана, имевшей непосредственный контакт с алмазом, наблюдается сплошной тонкий металлизированный слой (см. рис. 4, δ), образованный при нагревании образцов при спекании. При разъединении образцов почти весь металлизированный слой перешел на поверхность таблетки ти-

Таблииа 2 Фазовый состав поверхностей раздела "алмаз — таблетка титана

Фаза	Пространственная группа симметрии	Параметры решетки, нм	Кристалл алмаза	Таблетка железа
С (алмаз)	Fd-3m	a = 0.3566	+	_
С (графит)	P63/mmc	a = 0.2464 c = 0.6736	_	_
Ti	P63/mmc	a = 0.2951 c = 0.4683	Следы	+
TiC	Fm-3m	a = 0,4310	Следы	Следы

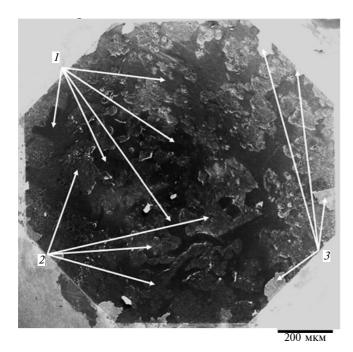


Рис. 5. РЭМ в режиме вторичных электронов поверхности алмаза после разъединения контактной пары "алмаз — таблетка титана":

1— гладкие и ровные поверхности кристаллов; 2— участки с разрушениями и следами травления; 3— металлизированный слой

тана. Металлизированный слой полностью скрывает поверхность таблетки титана (см. рис. 4, δ). На дифрактограммах поверхности металлизированного слоя зафиксированы фазы титана и следы карбида титана (см. табл. 2). На дифрактограммах поверхности металлизированного слоя нет линий графита. Отсутствие графита на металлизированном слое таблетки титана также подтверждает сканирование поверхности рамановским спектрометром, настроенным на две характерные полосы графита (G и G^{I} или 2D) в спектре комбинационного рассеяния.

На рис. 6 показаны морфология и структура поверхности таблетки титана.

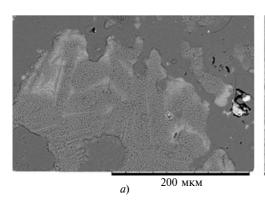
В табл. 3 представлены результаты рентгеноспектрального анализа участков поверхности металлизированного слоя, приведенных на рис. 6, δ , анализ которых показал, что отличающиеся морфологией участки имеют примерно одинаковый химический состав. Второй участок металлизированного слоя имеет шероховатую поверхность с пористой структурой (см. рис. 6, δ), его толщина составляет 1200 ± 180 нм. Под этим участком металлизи-

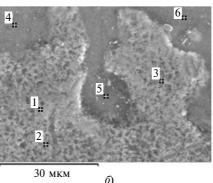
рованного слоя находятся спекшиеся зерна порошка титана (см. рис. 6, в). Средняя микротвердость металлизированного слоя, образованного при термообработке пары "алмаз — таблетка титана", составила 3795 \pm 62 МПа, тогда как средняя микротвердость поверхности таблетки титана, которая при нагревании не контактировала с алмазом, составила 3120 \pm 56 МПа. Небольшое увеличение микротвердости металлизированного слоя по сравнению с микротвердостью поверхности титана, не контактирующей с алмазом, свидетельствует о карбидизации первого.

Результаты исследований

Установлено, что структура и прочность переходной зоны пары алмаз—железо, сформированных при контактном взаимодействии образцов в вакууме, существенно отличаются от пары алмаз—титан, несмотря на одинаковые условия эксперимента, включая температурные режимы.

При контактном взаимодействии алмаза с железом на поверхности первого образуется металлизированное покрытие (см. рис. 1, а), которое представляет собой композит из фаз железа, карбида железа (Fe₃C) и графита переменного состава. Как известно, взаимодействие алмаза с химически активными относительно углерода металлами при Р—Т условиях, соответствующих области его метастабильности, проходит через стадию каталитичес-





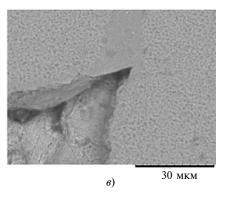


Рис. 6. Структуры поверхности таблетки титана:

 $a, \, \delta$ — металлизированный слой; θ — спекшиеся зерна порошка титана

кого фазового превращения алмаза в графит [12, 13]. Именно графит, образующийся на поверхности алмаза при контактном нагревании, является поставщиком углерода, диффундирующего в металл и образующего карбиды металла. Изменение исходной гладкой поверхности кристалла алмаза (см. рис. 3) является следствием графитизации алмаза под каталитическим воздействием химически активного к углероду железа. Металлизированное покрытие прочно соединяется с алмазом, и разъединение происходит исключительно по границе "металлизированное покрытие — поверхность железа", а также по кристаллу алмаза вследствие его разрушения с переносом его сколов на поверхность железа. Анализ РЭМ, карты рентгеноспектрального микроанализа (см. рис. 1) и спектров комбинационного рассеяния (см. рис. 2) показал, что в переходной зоне алмаз-железо графит находится в виде изолированных друг от друга локальных образований — прерывистые участки графита не соединены между собой и не образуют сплошного слоя. Это свидетельствует о том, что в условиях эксперимента практически весь углерод, образовавшийся в результате разрушения поверхности алмаза под каталитическим воздействием железа, расходуется на формирование металлизированного покрытия. Отсутствие сплошного слоя графита на межфазной границе "алмаз — металлизированное покрытие" является важнейшим фактором, обусловливающим высокую прочность сцепления металлокарбидного покрытия с алмазом. Формирование локальных образований графита на межфазной поверхности можно объяснить конечной скоростью карбидообразования или выпадением избыточного углерода из пересыщенного твердого раствора металла при снижении температуры (охлаждении образцов) [12, 13].

Структурные исследования показали, что металлизированное покрытие с мелкозернистой структурой (см. рис. 3) плотно сопряжено с поверхностью кристалла алмаза. При этом важным фактором является полное отсутствие микропустот и микрополостей на межфазной границе "алмаз — металлизированный слой". Это указывает на то, что в условиях эксперимента термохимическое адгезионное взаимодействие на межфазной границе приводит к образованию прочной связи в паре "алмаз — карбид железа", обусловленной, вероятно, образованием ковалентных связей между атомами углерода и атомами металла [14].

Структурные исследования поверхностей алмаза и титана после их разъединения показали, что на поверхности алмаза имеются лишь небольшие участки, расположенные в основном по краям кристалла алмаза, где металлизированный титаном слой остался закрепленным. На значительной части поверхности алмаза, соприкасавшейся при термообработке с таблеткой титана, имеются разные по размерам и формам локальные участки следов частичного разрушения и травления вследствие каталитической графитизации (см. рис. 5). Однако почти такая же по площади поверхность алмаза, находившаяся при нагревании в контакте с титаном, осталась такой же ровной и гладкой, как и не подвергнутая термообработке поверхность кристалла, т. е. на ней отсутствуют следы графитизации алмаза.

Таблица 3 Рентгеноспектральный микроанализ поверхности таблетки титана

Точки	Содержан	ие, мас. %	Фазы	
замера	С	Ti	Фазы	
1	25,18	74,82	TiC, Ti	
2	21,36	78,64	TiC, Ti	
3	26,44	73,56	TiC, Ti	
4	30,86	69,14	TiC, Ti	
5	27,40	72,60	TiC, Ti	
6	25,30	74,70	TiC, Ti	

Причем оба участка — и со следами разрушения (графитизации), и не подвергавшиеся графитизации, равномерно распределены по поверхности кристалла алмаза.

На поверхности же таблетки титана, непосредственно контактирующей с алмазом, имеется сплошной тонкий металлизированный слой (см. рис. 4, δ), образованный в процессе твердофазного спекания и перенесенный на нее при разъединении образцов. В данном эксперименте наиболее вероятным механизмом формирования сплошного промежуточного металлизированного слоя в межфазной зоне является испарение титана (сублимация) с последующим осаждением на прилегающих поверхностях и с частичной карбидизацией в результате диффузии углерода из графитизированных участков поверхности алмаза.

Прочного сцепления металлизированного титаном слоя с поверхностью алмаза при заданных условиях не получается, несмотря на то, что в жидком состоянии титан и сплавы на его основе активно взаимодействует с алмазом [6]. При этом угол смачивания расплава титана к поверхности алмаза близок к нулю. Кроме того, известно, что работа адгезии титана к алмазу превышает работу адгезии расплава железа к алмазу. Основной причиной слабого сцепления металлизированного титаном слоя с поверхностью алмаза, наблюдаемого в эксперименте, является то, что из-за слабой и частичной каталитической графитизации поверхности алмаза не происходит интенсивной карбидизации металлизированного слоя, обеспечивающего химическое сцепление последнего с поверхностью алмаза через карбиды титана [13—15]. Слабая и частичная графитизация поверхности алмаза обусловлена наличием на исходной поверхности таблетки титана тонкой оксидной пленки. При подготовке титановой таблетки оксидную пленку с зерен исходного порошка титана специально не удаляли (например, механической активацией, предварительным отжигом зерен исходного порошка в восстановительной среде и т. п.), чтобы изучить структуру и прочность переходной зоны, сформированных при твердофазном спекании образцов в данных условиях.

Известно, что титан характеризуется высоким химическим сродством не только к углероду, но и к кислороду, поэтому в воздухе на поверхности его зерен почти сразу образуется тонкая оксидная пленка титана (TiO_2), обладающая высокой термической стойкостью [6]. В эксперименте на начальном этапе и при продолжительном нагревании образца "алмаз — таблетка титана" при температурах до 900 °C из-за приповерхностной оксидной пленки каталитическое влияние титана на процесс разрушения алмаза минимизируется, т. е. поверхность алмаза слабо поддается каталитической графитизации, что согласуется с результатами работы [12].

В работе [12] показано, что при контактном взаимодействии алмаза с переходными металлами образование термодинамически прочных оксидов на поверхности металла подавляет каталитическое фазовое превращение алмаза в графит. В кратковременном интервале нагревания с температуры 900 до 1090 °C оксидная пленка, вероятно, разрушается, растворившись в металле. И при сублимации в межфазной зоне формируется металлизированный титановый слой. При этом из-за дефицита углерода вследствие слабой и частичной графитизации поверхности алмаза интенсивной карбидизации металлизированного титаном слоя, обеспечивающей химическое сцепление, не происходит. Поэтому для получения прочного металлизированного слоя на поверхности алмаза при термодиффузионном нанесении и обеспечения их адгезионное взаимодействие следует удалять оксидную пленку с зерен исходного порошка титана.

Образование при контакте алмаза с железом металлизированного покрытия, прочно сцепленного с алмазом, при циклограммной работе вакуумной печи, как правило, используемой при спекании с пропиткой медью матрицалмазных инструментов, показал, что небольшие добавки порошка железа вокруг алмазных зерен, например, в вольфрамкобальтовой порошковой смеси, могут значительно повысить алмазоудержание металлокерамических матриц.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Булгаков В. И., Лаптев А. И., Поздняков А. А.** Улучшение закрепления алмазного зерна в связке при изготовлении камнеразрушающего инструмента горячим прессованием // Изв. вузов. Цветная металлургия. 2005. № 6. С. 69—72.
- 2. **Направленное** формирование межфазной границы алмаз-матрица с использованием нанопокрытий / М. М. Яхутлов, Б. С., Карамурзов, 3. Ж. Беров и др. // Изд-во Кабардино-Балкарского ГУ. 2011. Т. 1. № 4. С. 23—25.
- 3. **Коновалов В. А., Шатохин В. В.** Взаимосвязь прочности закрепления зерен в связке со стойкостью алмазно-абразивного инструмента // Породоразрушающий и металлообрабатывающий инструмент техника, технология его изготовления и применения: Сб. науч. тр. ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины. 2009. № 12. С. 508—513.
- 4. **Влияние** металлизации алмазов на структурообразование и прочность композиционного материала / А. М. Исонкин, Т. М. Дуда, Н. Н. Белявина, В. Н. Ткач // Наукови праци ДонНТУ. Сер. Горно-геологическая. 2013. № 2 (19). С. 148—154.
- 5. Найдич Ю. В., Колесниченко Г. А. Взаимодействие металлических расплавов с поверхностью алмаза и графита. Киев: Наукова думка, 1967. 89 с.
- 6. Семенов А. П., Поздняков В. В., Крапошина Л. Б. Трение и контактное взаимодействие графита и алмаза с металлами сплавами. М.: Наука, 1974. 110 с.
- 7. **Influence** of chromium as carbide forming doping element on the diamond retention in diamond tools /

- W. Tillmann, M. Tolan, N. F. Lopes-Dias // Proceedings of the International Conference on Stone and Concrete Machining. 2015. Vol. 3. P. 21—30.
- 8. **Hsieh Y. Z., Lin S. T.** Diamond tool bits with iron alloys as the binding matrices // Materials Chemistry and Physics. 2001. Vol. 72. N. 2. P. 121—125.
- 9. **Carbon** reactivity of binder metals in diamond-metal composites characterization by scanning electron microscopy and X-ray diffraction / W. Tillmann, M. Ferreira, A. Steffen // Diamond & Related Materials. 2013. Vol. 38. P. 118—123.
- 10. **Microstructure** and property of sub-micro WC 10 % Co particulate reinforced Cu composite prepared by selective laser sintering / Gu Dongdong, Shen Yi-Fu, Dai Peng, Yang Ming-Chuan // Transactions of Nonferrous Metals Society of China. 2006. N. 16. P. 357—362.
- 11. Структурная организация высокоизносостойких алмазосодержащих композитов на основе твердосплавных порошков, полученных методом спекания с пропиткой медью / П. П. Шарин, С. П. Яковлева, В. Е. Гоголев, М. И. Васильева // Перспективные материалы. 2015. № 6. С. 66—77.
- 12. **Ножкина А. В.** Влияние металлов на фазовое превращение алмаза в графит // Сверхтвердые материалы. 1988. № 3. С. 11—15.
- 13. **Строение** и прочность переходной зоны при твердофазном высокотемпературном взаимодействии алмаза с карбидообразующими металлами хромом и кобальтом / П. П. Шарин, С. П. Яковлева, В. Е. Гоголев, В. И. Попов // Перспективные материалы. 2016. № 7. С. 47—60.
- 14. **Упрочнение** металлической матрицы карбидом титана, полученного реакцией в системе алмаз—титан—никель / Кушталова И. П., Стасюк Л. Ф., Ускокович Д. П. и др. // Бюл. химической компании Boegrad. 1984. № 49 (9). С. 555—561.
- 15. **Реакционное** спекание в системе алмаз-карбид титана-хром под высоким давлением / Л. Ф. Стасюк, И. П. Кушталова, Д. П. Ускокович и др. // Бюл. химической компании Boegrad. 1984. № 49 (9). С. 563—569.
- 16. **Artini M. L., Muolo A.** Passerone, Diamond-metal interfaces in cutting tools: a review // Journal of Materials Science. 2012. Vol. 47. Is. 7. P. 3252—3264.
- 17. **Effects** of Cu and Cu/Ti interlayer on adhesion of diamond film / Y. Huang, H. Xiao, Ma Zh // Surface and Coatings Technology. 2007. Vol. 202. N. 1. P. 180—184.

В. К. АЛЕХИНА, Р. М. БИКБАЕВ, В. А. ГЛУЩЕНКОВ, канд. техн. наук, Ф. В. ГРЕЧНИКОВ, д-р техн. наук, академик РАН (Самарский национальный исследовательский университет им. академика С. П. Королева), e-mail: vgl@ssau.ru

Использование материалов с памятью формы в технических устройствах

Проанализированы существующие многозвенные силовые приводы из термически тонких силовых элементов из сплава ТН-1 с памятью формы. Предложены эффективный способ сборки узла силовых элементов и применение многозвенного силового привода в лабораторном прессе для разделительных операций тонколистовых заготовках.

Ключевые слова: многозвенный силовой привод, силовой элемент, тонколистой материал, память формы, разделительная операция.

The existing multi-link power drives from thermally thin power elements from a TH-1 alloy with shape memory are analyzed. An effective method for assembling a unit of power elements and the use of a multi-link power drive in a laboratory press for separating thin-sheet blanks are proposed.

Keywords: multilink power drive, power element, thin-sheet material, shape memory, separation operation.

Одной из главных задач современного машиностроительного производства остается энергосбережение. Для ее решения ведутся исследования в следующих направлениях: совершенствование существующих технологий для уменьшения потребления энергии; поиск и разработка новых нетрадиционных эффективных источников энергии; создание современных методов преобразования энергии для необходимого использования.

Например, для последнего направления предлагается преобразование тепловой энергии в механическую работу путем структурных мартенситноаустенитных превращений в металле, что позволяет создавать необходимые усилия и перемещения. Структурные превращения более характерны для сплавов с эффектом памяти формы (СПФ), в основе которого лежат термоупругие бездиффузионные мартенситные превращения. При направленной перестройке кристаллической решетки металла возникают необходимые напряжения и деформации. Основные преимущества использования СПФ в технических устройствах достигаются в результате прямого преобразования тепловой энергии в механическую работу. На этом основано создание силовых приводов [1—3].

Лучшее сочетание термомеханических свойств имеют титано-никелевые СПФ, поэтому их сейчас наиболее широко применяют в машиностроении. Созданные на их основе стержневые силовые приводы, как правило, одноразовые и используются в качестве отделяющих, регулирующих, закрепляющих и перемещающих элементов [4, 5]. Существуют некоторые ограничения их применения из-за неравномерности нагрева стержня и сложности наведения "памяти формы" [6].

В данной статье рассматриваются многоцикловые силовые приводы из СПФ для разных деформирующих устройств: прессов; инструментов, используемых в МЧС; приборов для измерения твердости и др. (рис. 1). Может существовать несколько конструктивных вариантов силовых приводов.

Разработана конструкция многозвенного силового привода, состоящего из термически тонких силовых элементов I (проволочных, листовых, трубчатых) (рис. 2). Эксперимент подтвердил предположение о том, что усилие привода определяется суммой усилий, развиваемых каждым элементом. Предложено новое техническое решение по креплению силовых элементов в единый узел — силовой привод. Механическое крепление, точечная приварка и другие способы крепления не обеспечивают необходимую прочность. Суть нового крепления — заделка элементов I в сборочном узле путем их гибки или формовки и фиксации в таком состоянии в основании S кольцом S, деформируемым импульсным магнитным полем (рис. 3) [7].

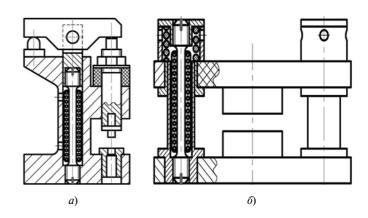


Рис. 1. Пресс (a) и пресс-штамп (b) со стержневым силовым приводом из материала с памятью формы

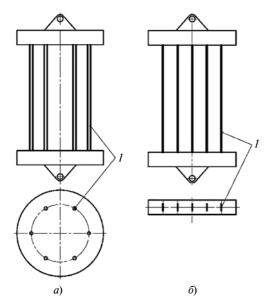


Рис. 2. Многозвенные силовые приводы из термически тонких проволочных (a) и листовых (δ) силовых элементов I

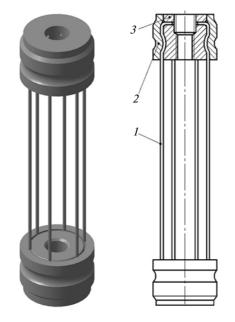


Рис. 3. Заделка силовых элементов в корпус силового привода

Получив прочную и надежную сборку силовых элементов, провели цикл их испытаний с целью определения развиваемых рабочих усилий (деформационно-силовых характеристик), скорости срабатывания силового привода, усилия для его возврата в исходное положение и других параметров. Для определения параметров создали специализированный стенд (рис. 4), представляющий собой раму 1, на которой размещены узлы крепления силового элемента 2, механического растяжного устройства 3, подводы тока 4, измерительные блоки 5 усилия и температуры, а также сам силовой элемент 6. Растяжное устройство имеет упор 7, ограничивающий перемещение Δl силового элемента при восстановлении "памяти формы".

В качестве силового элемента использовали проволоку из материла ТН-1 с памятью формы. Нагрев осуществляли пропусканием тока через силовой элемент. При испытании силового элемента измеряли силу I тока, температуру T нагрева и усилие P, развиваемое силовым элементом (рис. 5). Меняя величины I и ΔI , получили параметры, позволившие построить деформационно-силовую зависимость σ — δ (рис. 6), где σ — развиваемое напряжение, МПа; δ — деформация памяти формы, %.

Производительность устройства определяется скоростями нагрева и охлаждения силового элемента. Скорость структурных мартенситно-аустенитных превращений весьма высока и равна скорости упругих волн в металле, но для совершения всего цикла (от начала и до конца превращения) необходимо время для обеспечения заданного температурного интервала "нагрев — охлаждение".

Восстановление размеров силового привода после охлаждения под действием возвратного усилия обеспечивает его многоцикловый режим работы. Возвратное усилие должно составлять $15 \div 20~\%$ от развиваемого рабочего усилия, что обеспечит многотысячный ресурс его работы.

По полученным в результате испытаний параметрам силового привода спроектировали, изгото-

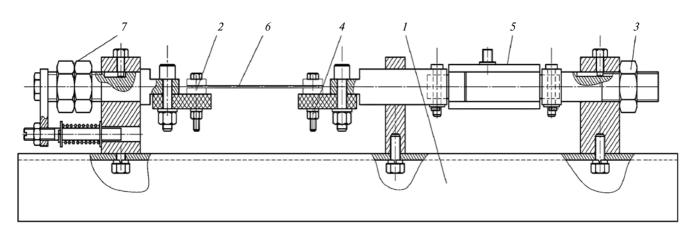


Рис. 4. Устройство для испытания проволочных силовых элементов

вили и опробовали в работе лабораторный образец пресса для вырубки-пробивки деталей из тонколистового материала (рис. 7). Пресс включает силовой блок и блок нагрева (до 100 °C) и охлаждения (до 20 °C) с элементами их автоматизации.

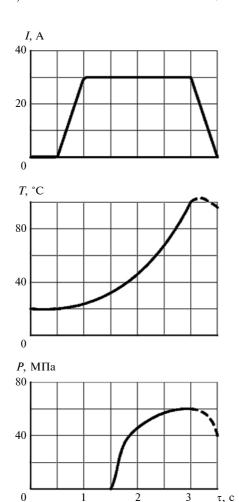


Рис. 5. Параметры, фиксируемые при испытании силового элемента на созданном стенде

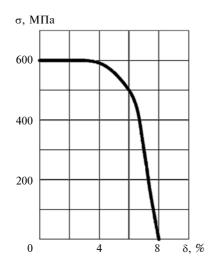


Рис. 6. Деформационно-силовая диаграмма σ-δ



Рис. 7. Пресс с многозвенным силовым приводом

Заключение

- 1. Создан многозвенный силовой привод из термически тонких силовых элементов.
- 2. Разработан надежный способ заделки силовых элементов в основание путем деформирования кольца импульсным магнитным полем.
- 3. Создан стенд для испытания силового элемента, позволяющий измерять параметры, необходимые для расчета и проектирования силового привода в целом.
- 4. Экспериментальные исследования силовых элементов позволили получить характеристики для расчета и проектирования силового привода для конкретных технологических задач.
- 5. Спроектирован, изготовлен и испытан в лабораторных условиях опытный образец пресса для разделительных операций при изготовлении деталей из тонколистового материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Механическое** поведение сплавов с памятью формы и их использование в технике / М. А. Хусаинов, В. А. Андреев, А. Б. Афанасьев и др. // Вестник Новгородского ГУ. 2005. № 30. С. 1-11.
- 2. Сплавы никелида титана с памятью формы. Ч. І. Структура, фазовые превращения и свойства: Монография / В. Г. Пушин, С. Д. Прокошкин, Р. З. Валиев и др.; Науч. ред. В. Г. Пушин. Екатеринбург: УрО РАН, 2006. 438 с.
- 3. **Корнилов И. И., Качур О. К., Белоусов Е. В.** Никелид титана и другие сплавы с эффектом "памяти". М.: Наука, 1977. 161 с.
- 4. Тихонов А. С., Герасимов А. П., Прохорова И. И. Применение эффекта памяти формы в современном машиностроении. М.: Машиностроение, 1981. 76 с.
- 5. **Глущенков В. А., Феоктистов Е. С.** Пресс с силоприводом из сплава с памятью формы // Кузнечноштамповочное производство. 1966. № 4. С. 21—22.
- 6. Алехина В. К., Глущенков В. А. Многозвенные силоприводы из материала с памятью формы и их характеристики // Известия Самарского НЦ РАН. 2017. Т. 19. № 1 (3). С. 483—488.
- 7. **Пат. 182028 Рос. Федерация:** МПК F03G 7/0. Электротермический силовой привод.

А. Г. СУСЛОВ, О. Н. ФЕДОНИН, доктора технических наук, Д. М. МЕДВЕДЕВ, канд. техн. наук (Брянский ГТУ), e-mail: naukatm@yandex.ru

Проектирование функционально ориентированных технологических процессов

Рассматриваются методика и структурная схема проектирования функционально ориентированных технологических процессов изготовления деталей машин. Приведены теоретические и экспериментальные данные взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей и условий механической обработки.

Ключевые слова: функционально ориентированная технология, деталь, эксплуатационные свойства, метод, режим обработки.

The methodic and the structural diagram of the design of functionally oriented technological processes of manufacturing machine parts are considered. The theoretical and experimental data on the relationship of the operational properties of parts and machining conditions are given.

Keywords: functionally oriented technology, part, operational properties, method, processing mode.

Надежность работы машин определяется эксплуатационными свойствами их деталей и соединений: контактной жесткостью, износостойкостью, коррозионной стойкостью и др., которые составляют основу специальной наукоемкой технологии, называемой функционально ориентированной технологией [1].

В настоящее время эксплуатационные свойства деталей и их соединений обеспечиваются решением двух задач [2]:

- 1) для конструктора это выбор материала деталей, определение их размеров, точности и параметров качества поверхностного слоя, обеспечивающих необходимые эксплуатационные свойства исходя из их функционального назначения;
- 2) для технолога это технологическое обеспечение точности размеров и параметров качества поверхностного слоя деталей, назначенных конструктором.

Анализ этих задач показал необходимость их объединения. Конструктор практически не может определить оптимальное сочетание параметров качества поверхностных слоев деталей, в частности параметров шероховатости *Ra*, *Sm* и *tp*, для обеспечения износостойкости, так как одинаковую интенсивность изнашивания могут обеспечивать десятки вариантов. Оптимальным будет сочетание, при котором технологическая себестоимость — наименьшая, а это уже задача технолога. Поэтому появилось новое научное направление в технологии

машиностроения — проектирование функционально ориентированных технологических процессов, обеспечивающих эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений, структурная схема проектирования которых приведена на рисунке.

В статье приводятся справочные данные о возможностях разных способов механической обработки в обеспечении непосредственно эксплуатационных свойств деталей, а также уравнения их взаимосвязи.

Контактная жесткость поверхностей деталей, определенная по методу [3], при разных способах механической обработки приведена в табл. 1.

Взаимосвязи контактной жесткости поверхностей двух деталей с условиями их лезвийной обра-

Условия функционирования машин (нагрузка, скорость, температура, окружающая среда и т. д.) Эксплуатационные свойства деталей машин и их соединений и допустимые пределы их изменения, определяющие оптимальную надежность и точность узлов и машины в целом Банк данных взаимосвязи эксплуатационных свойств деталей и их соединений с физико-механическими характеристиками материалов и условиями изготовления, или точностью и параметрами качества поверхностных слоев и последних с условиями обработки Условия производства (имеющиеся материалы, оборудование, инструменты, оснастка и т. д.) Выбор материалов деталей и методов изготовления изделий с учетом условий конкретного производства Условия изготовления деталей и соединений для выбранных технологических методов, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства Эксплуатационные свойства деталей и их соединений обеспечены? Да Расчет себестоимости выбранных технологических методов Выбор методов и условий изготовления деталей и соединений, обеспечивающих требуемые эксплуатационные свойства при наименьшей технологической стоимости ЭВМ

Структурная схема проектирования функционально ориентированных технологических процессов

ботки при первом j_1 и повторных j_{Π} нагружениях определяются теоретическими уравнениями:

$$\begin{split} j_1 &= \frac{p}{y_{\Pi\Pi} + y_{y\Pi}}; \quad j_{\Pi} = \frac{p}{y_{y\Pi}}; \\ y_{\Pi\Pi} &= \sum_{i=1,\,2} \pi \bigg(\frac{0.48\pi p\,Rz_i\,Wz_i\,H_{\max i}}{H_{\mu 0\,i}} \bigg)^{1/3}; \\ y_{y\Pi} &= \sum_{i=1,\,2} \bigg(10\pi^2 \frac{1 - \mu_i^2}{E_i}\,H_{\mu 0\,i}S_i \frac{y_{\Pi\Pi}i}{Rz_i} \bigg); \\ Rz &= \frac{S^{2,7}}{10} \,+\, Cp_y S^y V^z \frac{HB_{\max}^n t^x - HB_{\min}^n (t - Rz_{\text{\tiny MCX}})^x}{HB_{\text{\tiny Cp}}^n j_{\text{\tiny TC}}}; \end{split}$$

 $Wz = Cp_y S^y V^z \frac{HB_{\max}^n t^x - HB_{\min}^n (t - Wz_{\text{ucx}} - Rz_{\text{ucx}})^x}{HB_{\text{cp}}^n j_{\text{тс}}},$ где p — номинальное давление в контакте; $v_{\text{пл.}}$ —

где p — номинальное давление в контакте; $y_{\Pi\Pi}$ — пластические контактные деформации деталей при первом приложении нагрузки; $y_{\Pi\Pi}$ — упругие контактные деформации деталей; Rz — средняя высота

профиля шероховатости поверхности; W_Z — средняя высота волнистости поверхности; H_{\max} — высота наибольшего выступа макроотклонения поверхности; $H_{\mu 0}$ — микротвердость поверхности; μ — коэффициент Пуассона; E — модуль упругости; HB — твердость материала; S — продольная подача; V — скорость резания; t — глубина резания; Rz_{\max} — средняя высота профиля шероховатости исходной поверхности; Wz_{\max} — средняя высота волнистости исходной поверхности; f_{TC} — жесткость технологической системы; f_{\max} , f_{\max} , f_{\max} , f_{\max} — коэффициенты [2, 4].

Взаимосвязи контактной жесткости поверхностей деталей, определенной по методу [3], с условиями их механической обработки определяются эмпирическими уравнениями:

1) при фрезеровании, точении и растачивании:

$$j = k_0 \frac{V^{k_1} H B^{k_3}}{S^{k_2}}; \tag{1}$$

2) при шлифовании:

$$j = k_0 \frac{HB^{k_3}}{S^{k_1} Z^{k_2}}. (2)$$

Таблица 1

Контактная жесткость поверхностей деталей при первом j_1 и повторных j_{Π} нагружениях

Контактная жесткость, Па/мкм, с учетом Способ только шероховатости шероховатости и волнистости обработки j_1 j_1 Плоские поверхности Торцевое фрезерование: $0,16 \div 14,1$ $0,32 \div 33,2$ $0,11 \div 10,2$ $0,25 \div 24,3$ черновое получистовое 1,62÷38,2 4,96÷62,3 $0,73 \div 30,5$ $1,65 \div 60,2$ 4,85÷46,6 $18,2 \div 72,3$ $2,85 \div 39,6$ 12,5÷71,6 чистовое Плоское шлифование: $4.2 \div 40.5$ 16.5÷72.6 $2.5 \div 34.2$ $8.2 \div 60.3$ черновое $18,2 \div 52,4$ $31,2 \div 80,0$ 10,2÷42,4 26,6÷70,1 получистовое 28,8÷59,2 20,5÷52,8 48,2÷76,2 чистовое 58,8÷83,4 Наружные цилиндрические поверхности Точение: черновое $0,24 \div 19,74$ $0,43 \div 41,1$ $0,38 \div 27,63$ $0,15 \div 11,6$ $1,79 \div 35,38$ 4,98÷63,18 $0,67 \div 27,93$ $1,5 \div 54,42$ получистовое 4,41÷41,6 17,18÷78,51 1,72÷32,76 9,01÷58,98 чистовое Круглое шлифование: 17,35÷51,91 42,35÷103,55 13,32÷45,35 33,78÷89,79 черновое $22.4 \div 57.37$ 59,73÷122,91 17.15÷48.73 45.63÷100.34 получистовое чистовое 33,73÷65,89 78,08÷137,94 24,35÷58,94 63,18÷125,74 Внутренние цилиндрические поверхности Растачивание: $0,11 \div 12,97$ $0,27 \div 29,43$ $0.05 \div 9.94$ $0,17 \div 22,79$ черновое 1,58÷43,78 4,97÷81,92 $0,79 \div 33,49$ 1,91÷65,91 получистовое 5,09÷51,04 19,06÷101,72 $4,1 \div 38,96$ 13,25÷83,85 чистовое Внутреннее шлифование: 45,19÷103,89 37.72÷89.11 18,17÷50,29 14,21÷44,73 черновое получистовое 26,94÷53,74 65,5÷116,34 19,17÷45,78 41,42÷97,52 чистовое 35,93÷61,67 76,01÷129,25 28,45÷56,76 70,52÷116,16

Здесь при торцевом фрезеровании $V=40\div120$ м/мин, $S=0.02\div0.1$ мм/зуб; при точении и растачивании $V=40\div200$ м/мин, $S=0.04\div0.1$ мм/об; при шлифовании продольная подача равна $0.2\div0.5$ доли ширины шлифовального круга; $HB=105\div290$; $Z=10\div100$ — зернистость шлифовального круга.

Значения коэффициентов k_0 , k_1 , k_2 , k_3 в уравнениях (1) и (2) при разных способах механической обработки и видов контроля контактной жесткости по методу [3] приведены в табл. 2.

Взаимосвязи интенсивности I_h линейного изнашивания цилиндрических поверхностей деталей в период приработки, определенной по методу [5], с

Значения коэффициентов $k_0,\ k_1,\ k_2,\ k_3$ уравнений (1) и (2)

Таблица 2

Способ обработки	Способ обработки. С учетом только шероховатости С учетом шероховатости и волнистост				истости			
Способ обработки	k_0	k_1	k_2	k_3	k_0	k_1	k_2	k_3
T. 1			Плоские пов	верхности				
Торцевое фрезерование:	0.1.10 ⁻⁷	0.45	1.7	2.75	4.1.10-7	0.65	1.75	2.65
черновое	$\frac{8,1\cdot 10^{-7}}{6}$	$\frac{0,45}{0,68}$	$\frac{1,7}{1,6}$	$\frac{2,75}{2,65}$	4,1 · 10	$\frac{0,65}{0,62}$	$\frac{1,75}{2,1}$	$\frac{2,65}{2,60}$
	$1,5 \cdot 10^{-6}$	-			$1.8 \cdot 10^{-6}$			
получистовое	$\frac{3,2 \cdot 10^{-3}}{3}$	$\frac{0,35}{0,30}$	$\frac{0.75}{0.85}$	$\frac{2,1}{1,6}$	1,85 · 10 °	$\frac{0,54}{0,56}$	$\frac{1,14}{1,17}$	$\frac{2,31}{2,1}$
	$ \begin{array}{r} \hline 1,5 \cdot 10^{-6} \\ 3,2 \cdot 10^{-5} \\ \hline 1,6 \cdot 10^{-3} \\ \hline 5 \cdot 10^{-3} \\ \hline 0,42 $				$1,4 \cdot 10^{-3}$			
чистовое	$5 \cdot 10^{-3}$	0,26	0,44	$\frac{1,1}{0,75}$	$4.2 \cdot 10^{-4}$	0,32	0,50	$\frac{2,65}{0,95}$
	0,42	0,19	0,36	0,75	$\frac{4,1 \cdot 10^{-7}}{1,8 \cdot 10^{-6}}$ $\frac{1,85 \cdot 10^{-6}}{1,4 \cdot 10^{-5}}$ $\frac{4,2 \cdot 10^{-4}}{12 \cdot 10^{-3}}$	0,35	0,29	0,95
Плоское шлифование:	1.1	0,35	0,26	0,60		0,32	0,20	2,75
черновое	$\frac{1,1}{3,6}$	$\frac{0,33}{0,28}$	$\frac{0,20}{0,20}$	$\frac{0,00}{0,32}$	$\frac{0,72}{2,2}$	$\frac{0.32}{0.26}$	$\frac{0,20}{0,18}$	$\frac{2,73}{0,58}$
	11,6	0,28	0,64	0,45	9,5	0,30	0,75	0,50
получистовое	20,7	0,25	0,6	$\frac{1}{0,40}$	$\frac{9,5}{17,6}$	$\frac{1}{0,20}$	0,60	0,40
чистовое	20,8	0,25	0,50	0,40	16,5	$\frac{0,35}{0,28}$	0,30	0,42
петовое	80,6	0,20	0,42	0,38	52,8	0,28	0,22	0,36
T		Наружны	е цилиндрич	еские поверх	кности			
Точение:	7.04. 10 ⁻⁷	0.47	1.0	2.72	2 (8 10 ⁻⁷	0.66	1 77	2.6
черновое	$\frac{7,04 \cdot 10^{-7}}{10^{-6}}$	$\frac{0,47}{0,66}$	$\frac{1,8}{1,76}$	$\frac{2,73}{2,63}$	$\frac{3,68 \cdot 10^{-7}}{10^{-10}}$	$\frac{0,66}{0,6}$	$\frac{1,77}{2,13}$	$\frac{2,6}{2,57}$
	$ \begin{array}{c} 1,21 \cdot 10^{-6} \\ 2,85 \cdot 10^{-5} \\ 1,27 \cdot 10^{-3} \end{array} $				$ \begin{array}{r} \hline 1,47 \cdot 10^{-6} \\ 1,79 \cdot 10^{-6} \\ \hline 1,3 \cdot 10^{-5} \end{array} $			
получистовое	$\frac{2,85 \cdot 10^{-2}}{2}$	$\frac{0,38}{0,32}$	$\frac{0.7}{0.84}$	$\frac{2,04}{1,54}$	$\frac{1,79 \cdot 10^{-5}}{5}$	$\frac{0,56}{0,58}$	$\frac{1,13}{1,15}$	$\frac{2,28}{2,05}$
	$1,27 \cdot 10^{-3}$				$1,3 \cdot 10^{-3}$			
чистовое	$\frac{0,004}{0,35}$	$\frac{0,29}{0,21}$	$\frac{0,47}{0,33}$	$\frac{1,2}{0,82}$	$3,95 \cdot 10^{-4}$	$\frac{0,34}{0,39}$	$\frac{0,52}{0,31}$	$\frac{1,45}{1,02}$
Круглое шлифование:	0,33	0,21	0,33	0,82	0,01	0,39	0,31	1,02
	2,57	0,44	0,27	0,65	0,88	0,38	0,22	0,79
черновое	$\frac{2,57}{7,14}$	0,39	0,21	$\frac{0,65}{0,56}$	4,52	0,29	0,19	0,61
получистовое	30,85	0,27	0,63	$\frac{0,41}{0,31}$	28,99	0,32	0,77	0,49
nony merobee	110,7	0,22	0,6	0,31	51,58	0,18	0,57	0,41
чистовое	$\frac{11,39}{23,73}$	$\frac{0.18}{0.13}$	$\frac{0,24}{0,17}$	$\frac{0,37}{0,35}$	$\frac{7,18}{18,39}$	$\frac{0,36}{0,27}$	$\frac{0,32}{0,19}$	$\frac{0,41}{0,34}$
	23,/3	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	, i		, ,	0,27	0,19	0,34
Растачивание:	j i	Внутренні	ие цилиндри [.] І	ческие повер	хности І		İ	Ī
	$4,41 \cdot 10^{-7}$	0,56	1,88	2,69	$4.03 \cdot 10^{-8}$	0,65	2,39	3,01
черновое	$\frac{4,41 \cdot 10^{-7}}{1,3 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,56}{0,67}$	$\frac{1,88}{1,9}$	$\frac{2,69}{2,56}$	$\frac{1}{2,09 \cdot 10^{-7}}$	$\frac{0,65}{0,51}$	$\frac{2,39}{2,34}$	2,98
	$1.69 \cdot 10^{-5}$	0.4	0.87		$1.79 \cdot 10^{-6}$			<u>2,43</u>
получистовое	$\frac{1,69 \cdot 10^{-5}}{1,04 \cdot 10^{-3}}$	$\frac{0.4}{0.36}$	$\frac{0.87}{0.92}$	$\frac{2,13}{1,54}$	$\frac{1,79 \cdot 10^{-6}}{9,33 \cdot 10^{-6}}$	$\frac{0,44}{0,72}$	0,96	$\frac{2,13}{2,03}$
	0,003		0,46		$9,33 \cdot 10$ $9,16 \cdot 10^{-4}$	0,15	0,42	
чистовое	$\frac{0,003}{0,12}$	$\frac{0,11}{0}$	$\frac{0,46}{0,36}$	$\frac{1,43}{1,04}$	$\frac{9,10\cdot 10}{12,64\cdot 10^{-3}}$	$\frac{0.13}{0.08}$	0,33	$\frac{1,6}{1,35}$
Внутреннее шлифование:	0,12	5	0,50	1,01	12,64 • 10	0,00	0,55	1,55
черновое	2,69	0,38	<u>0,24</u>	0,63	1,02	0,47	0,21	0,75
герповое	7,59	0,29	0,2	0,55	5,02	0,32	0,15	0,57
получистовое	$\frac{28,95}{72.7}$	$\frac{0,12}{0.16}$	$\frac{0.47}{0.4}$	$\frac{0.36}{0.37}$	15,48	$\frac{0.3}{0.30}$	0,51	$\frac{0.43}{0.30}$
	72,7 7.5	0,16 0,13	0,4	0,27 0,38	45,86 5,85	0,28 0,22	0,17	0,38
чистовое	$\frac{7,5}{16,1}$	$\frac{0.13}{0.08}$	$\frac{0,11}{0,1}$	$\frac{0,38}{0,39}$	$\frac{5,85}{25,25}$	$\frac{0,22}{0,18}$	$\frac{0,17}{0,13}$	$\frac{0,41}{0,27}$
	10,1	0,00	0,1	0,0)	25,25	5,10	0,13	5,27

Примечание. В числителе приведены значения коэффициентов для расчета контактной жесткости при первом нагружении, в знаменателе — при повторных нагружениях.

условиями их механической обработки определяются теоретическими уравнениями:

1) при чистовом точении:

$$I_h = 0.024 \frac{fN}{\pi dl} \left(\frac{St}{P_z}\right)^{1.34},$$

где f — коэффициент трения; N — нормальная нагрузка на трущуюся поверхность; d и l — диаметр и длина поверхности; P_z — касательная составляющая силы резания;

2) при чистовом круглом врезном шлифовании:

$$I_h = 0.08 \frac{fN}{\pi dl} \left(\frac{V_3 l S_p}{P_z V_K} \right)^{0.92},$$

где V_3 — скорость вращения заготовки; $S_{\rm p}$ — поперечная (радиальная) подача; $V_{\rm K}$ — скорость вращения шлифовального круга.

Взаимосвязи интенсивности линейного изнашивания цилиндрических поверхностей деталей в период приработки I_h , определенной по методу [5], с условиями их механической обработки определяются эмпирическими уравнениями:

1) при чистовом круглом врезном шлифовании стали 12XH3A (58÷63 HRC_3):

$$I_h = 1,65 \cdot 10^{-7} Z^{0,314} V_3^{0,254} S_p^{0,318}$$

где $Z=25\div 40;~V_3=20\div 40$ м/мин; $S_{\rm p}=0.001\div 0.005$ мм/об;

2) при алмазном выглаживании: стали 40X (40÷45 HRC_3) с усилием $F = 50 \div 300$ H:

$$I_h = 6.17 \cdot 10^{-7} V_{\rm R}^{0.108} S^{0.319} F^{-0.179};$$

стали 12XH3A (58÷63 HRC_9) с усилием $F = 50\div150$ H:

$$I_h = 7.15 \cdot 10^{-7} V_{\rm B}^{0.101} S^{0.393} F^{-0.295}$$

Здесь $V_{\rm B} = 40 \div 100$ м/мин — скорость выглаживания; $S = 0.05 \div 0.1$ мм/об.

Коррозионная стойкость (КС) деталей, полученная при разных способах механической обработки, приведена в табл. 3—5. Комплексный параметр КС характеризует скорость коррозии деталей после механической обработки [6].

Взаимосвязи параметра КС поверхностей деталей с условиями их обработки определяются теоретико-эмпирическими уравнениями:

1) при чистовом точении среднеуглеродистой стали:

KC =
$$1274 V^{0,416} S^{0,052} t^{0,468} r_{\rm B}^{(0,416 - n_{\rm K})} \times (50 + \gamma)^{-0,312} \alpha^{0,364} j_{\rm TC}^{0,572};$$

Гаолица
Коррозионная стойкость плоских поверхностей деталей

Способ обработки	Параметр КС
Торцевое фрезерование:	
черновое	7,3÷13,3
чистовое	5,2÷7,9
тонкое	4,2÷6,6
Цилиндрическое фрезерование:	
черновое	$6,0 \div 9,4$
чистовое	4,1÷7,6
тонкое	$2,2 \div 5,3$
Строгание:	
черновое	$7,3 \div 14,2$
чистовое	5,2÷9,1
тонкое	$2,6 \div 6,1$
Торцевое точение:	
черновое	$7,2 \div 9,2$
чистовое	4,3÷7,3
тонкое	2,8÷5,9
Шлифование:	, ,
черновое	9,2÷12,9
чистовое	6,8÷11,2
тонкое	5,3÷9,9
плосковершинное	1,5÷4,3
Протягивание:	
черновое	1,9÷6,5
чистовое	1,5÷4,3
Шабрение:	
черновое	$3,6 \div 6,2$
чистовое	2,0÷4,4
тонкое	1,4÷3,9
Накатывание роликами и шариковыми	
головками:	
черновое	6,3÷14,0
чистовое	$3,0 \div 8,6$
Вибронакатывание	4,8÷12,4
Суперфиниширование и полирование:	
обычное	2,5÷5,2
плосковершинное	1,4÷3,0
Притирка:	
обычная	$3,6 \div 5,0$
плосковершинная	1,2÷3,2

Таблица 4

Коррозионная стойкость наружных цилиндрических поверхностей деталей

Animapi teenix i	поверхностен детален
Способ обработки	Параметр КС
Обтачивание:	
черновое	6,8÷13,3
получистовое	4,2÷13,1
чистовое	3,2÷7,3
Шлифование:	, ,
черновое	9,8÷15,4
чистовое	7,3÷10,4
тонкое	4,9÷8,9
плосковершинное	1,5÷4,0
Суперфиниширование:	
обычное	2,0÷4,9
плосковершинное	1,5÷2,2
Полирование:	
обычное	1,0÷2,7
плосковершинное	1,0÷2,2
Притирка:	
обычная	2,0÷5,0
плосковершинная	1,2÷3,6
Обкатывание:	
черновое	6,9÷13,8
чистовое	2,9÷9,7
Выглаживание	1,7÷4,9
Вибронакатывание	5,4÷13,9
Электромеханическая	5,9÷10,0
Магнитно-абразивная	1,5÷5,0

2) при чистовом растачивании среднеуглеродистой низколегированной стали:

KC =
$$79.7V^{0.052}S^{0.104}t^{0.156}r_{\rm B}^{(-0.052-n_{\rm K})}$$
 ×
× $(50+\gamma)^{-0.572}J_{\rm TC}^{0.468}$.

Здесь $V=50\div150$ м/мин; $S=0.05\div0.5$ мм/об; $t=0.15\div0.9$ мм; $r_{\rm B}=0.5\div2$ мм — радиус вершины резания; $n_{\rm K}$ — коэффициент, зависящий от условий корродирования (в жидкости $n_{\rm K}=0.66$; при влажной и мокрой коррозии $n_{\rm K}=0.7$; при сухой коррозии $n_{\rm K}=0.5$); $\gamma=+4\div-4^\circ$ — передний угол; $\alpha=3\div7^\circ$ — задний угол; $j_{\rm TC}=10\div40$ кН/мм.

Герметичность соединений поверхностей деталей, определенная по нормализованному методу [6], при разных способах механической обработки приведена в табл. 6. В качестве герметизируемой среды рассматривались жидкость и газ под давлением $0.2~\mathrm{M}\Pi a$, а также разряженный до $10^{-2}~\mathrm{\Pi} a$ воздух.

Таблица 5 Коррозионная стойкость внутренних цилиндрических поверхностей деталей

Сверление и рассверливание 6,8÷15,3 Зенкерование: 5,7÷8,3 чистовое 3,1÷6,1 Развертывание: 6,1÷13,3 чистовое 4,8÷9,6 тонкое 3,6÷6,7 Протягивание: 9,3÷18,0 чистовое 9,3÷18,0 чистовое 6,5÷13,4 получистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 49,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 4,9÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8 Дорнование 3,0÷26,0	Способ обработки	Параметр КС
черновое 5,7÷8,3 чистовое 3,1÷6,1 Развертывание: 6,1÷13,3 чистовое 4,8÷9,6 тонкое 3,6÷6,7 Протягивание: 9,3÷18,0 чистовое 9,3÷18,0 чистовое 8,3÷10,0 Растачивание: 6,5÷13,4 чистовое 4,5÷7,7 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 12,0÷15,0 тонкое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8	Сверление и рассверливание	6,8÷15,3
чистовое 3,1+6,1 Развертывание: 6,1+13,3 чистовое 4,8÷9,6 тонкое 3,6÷6,7 Протягивание: 9,3±18,0 чистовое 8,3±10,0 Растачивание: 4,5÷7,7 чистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4±15,8 чистовое 7,2±10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5±4,3 Хонингование: 12,0±15,0 чистовое 7,5±10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5±12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4±13,8	Зенкерование:	
Развертывание: 6,1÷13,3 чистовое 4,8÷9,6 тонкое 3,6÷6,7 Протягивание: 9,3÷18,0 чистовое 8,3÷10,0 Растачивание: 6,5÷13,4 чистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 0бычная обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое чистовое 4,5÷12,1 Раскатывание: 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8	черновое	5,7÷8,3
черновое 6,1÷13,3 чистовое 4,8÷9,6 тонкое 3,6÷6,7 Протягивание: 9,3÷18,0 чистовое 8,3÷10,0 Растачивание: 6,5÷13,4 получистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	чистовое	3,1÷6,1
чистовое 4,8÷9,6 тонкое 3,6÷6,7 Протягивание: 9,3÷18,0 чистовое 8,3÷10,0 Растачивание: 6,5÷13,4 чистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8	Развертывание:	
тонкое Протягивание: черновое чистовое Растачивание: черновое получистовое получистовое получистовое плосковершинное плосковершинная плоскове	черновое	6,1÷13,3
Протягивание:	чистовое	4,8÷9,6
черновое 9,3÷18,0 Растачивание: 8,3÷10,0 черновое 6,5÷13,4 получистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 4,5÷12,1 выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8	тонкое	3,6÷6,7
чистовое 8,3÷10,0 Растачивание: 6,5÷13,4 получистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 2 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 4,5÷12,1 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8	Протягивание:	
Растачивание: 6,5÷13,4 получистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 4 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 4,5÷12,1 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8		9,3÷18,0
черновое 6,5÷13,4 получистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 2 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 4,5÷12,1 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8	чистовое	8,3÷10,0
получистовое 4,5÷7,7 чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 2 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 4,5÷12,1 Выглаживание 1,7÷5,2 Выбронакатывание 5,4÷13,8	Растачивание:	
чистовое 3,5÷7,3 тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	черновое	6,5÷13,4
тонкое 1,6÷5,4 Шлифование: черновое 9,4÷15,8 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: черновое 12,0÷15,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 5,8è8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 герновое 4,5÷12,1 герновое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	получистовое	4,5÷7,7
Шлифование:	чистовое	3,5÷7,3
черновое 9,4÷15,8 чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	тонкое	1,6÷5,4
чистовое 7,2÷10,7 тонкое 5,1÷9,5 плосковершинное 1,5÷4,3 Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	Шлифование:	
тонкое плосковершинное Хонингование: черновое чистовое тонкое плосковершинное Притирка: обычная плосковершинная Раскатывание: черновое чистовое чистовое Тонкое плосковершинная Притирка: обычная плосковершинная Раскатывание: черновое чистовое Чистовое Выглаживание Вибронакатывание 5,1÷9,5 1,5÷4,3 12,0÷15,0 7,5÷10,0 1,6÷3,1 Притирка: 1,6÷3,1 1,6÷4,2 Раскатывание: 1,6÷4,2 Раскатывание: 1,7÷5,2 Выглаживание Вибронакатывание 5,1÷9,5 1,7÷5,2 5,4÷13,8	черновое	9,4÷15,8
плосковершинное Хонингование: черновое чистовое тонкое плосковершинное Притирка: обычная плосковершинная Раскатывание: черновое чистовое чистовое Зараба плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое чистовое Выглаживание Вибронакатывание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 1,5÷4,3 1,6÷4,5 1,6÷4,1 1,6÷4,2 1,7÷5,2 1,7÷5,2 1,7÷5,2 1,7÷5,2 1,7÷5,2 1,7÷5,2 1,7÷5,2	чистовое	7,2÷10,7
Хонингование: 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	тонкое	5,1÷9,5
черновое 12,0÷15,0 чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	плосковершинное	1,5÷4,3
чистовое 7,5÷10,0 тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	Хонингование:	
тонкое 5,8÷8,5 плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	черновое	12,0÷15,0
плосковершинное 1,6÷3,1 Притирка: обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	чистовое	7,5÷10,0
Притирка: обычная	тонкое	5,8÷8,5
обычная 3,3÷6,7 плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	плосковершинное	1,6÷3,1
плосковершинная 1,6÷4,2 Раскатывание: черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	Притирка:	
Раскатывание: 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	обычная	3,3÷6,7
черновое 4,5÷12,1 чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	плосковершинная	1,6÷4,2
чистовое 2,9÷8,5 Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	Раскатывание:	
Выглаживание 1,7÷5,2 Вибронакатывание 5,4÷13,8	черновое	4,5÷12,1
Вибронакатывание 5,4÷13,8	чистовое	2,9÷8,5
	Выглаживание	1,7÷5,2
Дорнование 3,0÷26,0	Вибронакатывание	5,4÷13,8
	Дорнование	3,0÷26,0

Взаимосвязь герметичности Q соединения поверхностей двух деталей с условиями их механической обработки определяется теоретическими уравнениями:

$$Q = 0,0066 \frac{\pi d_{c} \Delta p u}{\mu' l_{c}} \times \left[\sum_{i=1,2} (Rz_{i} + 0.5[Wz_{i} + H_{\max i}]) - y_{K} \right];$$

$$Rz = h_{1} + Cp_{y}S^{y}V^{z} \frac{HB_{\max}^{n}t^{x} - HB_{\min}^{n}(t - Rz_{\text{MCX}})^{x}}{HB_{\text{cp}}^{n}j_{\text{TC}}} + h_{3} + Rz_{\text{Bp}};$$

для поверхностей, обработанных торцевым точением:

$$Wz = 1,2 Cp_{y}S^{y}\Delta V \frac{HB_{\max}^{n}t^{x} - HB_{\min}^{n}(t - Wz_{\text{MCX}} - Rz_{\text{MCX}})^{x}}{HB_{\text{cp}}^{n}j_{\text{TC}}} \times \sqrt{1 + \left[1 + \cos\left([m - 1]\frac{180}{m}\right)\right]^{2}};$$

$$\Delta V = \left(\frac{\pi d_{\text{H}}n_{\text{HI}}}{1000}\right)^{z} - \left(\frac{\pi d_{\text{O}}n_{\text{HI}}}{1000}\right)^{z};$$

$$H_{\max} = C \pm \frac{Cp_{y}t^{x}S^{y}\Delta VL_{\text{p}}^{3}}{3EJ};$$

для поверхностей, обработанных обтачиванием или растачиванием:

$$Wz = 1,2Cp_{y}S^{y}V^{z}\frac{HB_{\max}^{n}t^{x} - HB_{\min}^{n}(t - Wz_{\text{MCX}} - Rz_{\text{MCX}})^{x}}{HB_{\text{cp}}^{n}j_{\text{TC}}} \times \sqrt{1 + \left[1 + \cos\left(\left[m - 1\right]\frac{180}{m}\right)\right]^{2}};$$

$$H_{\max} = \Delta \pm \frac{Cp_{y}t^{x}S^{y}V^{z}X^{3}}{KEJ}.$$

В уравнениях: $d_{\rm c}$ и $l_{\rm c}$ — диаметр и длина соединения; Δp — перепад давления; u — постоянная Кармана; μ' — динамический коэффициент вязкости герметизируемой среды; $y_{\rm k} = y_{\rm III} + y_{\rm yII}$ — сближение контактирующих поверхностей; h_1 и h_3 — составляющие профиля шероховатости, обусловленные соответственно геометрией и кинематикой перемещения рабочей части инструмента и пластическими деформациями в зоне контакта инструмента и заготовки [2; 6]; $Rz_{\rm Bp}$ — средняя высота профиля шероховатости вершины резца; $d_{\rm H}$ — наружный диаметр; $d_{\rm O}$ — диаметр отверстия; $n_{\rm III}$ — частота вращения шпинделя; m — знаменатель ра-

Герметичность соединений поверхностей деталей

Способ обработки	$Q_{\rm x}$, ${ m mm}^3/{ m c}$	Q_{Γ} , г/с, при $\Delta p \geqslant 0,1$ Па	$Q_{\rm B}$, м ³ · МПа/с, при $\Delta p \leqslant 0,1$ Па
спосос сориостки			Σ _B , ii iii ii σ, ii pii Δ <i>p</i> < 0,1 11α
	Плоскі	ие поверхности	1
Торцевое точение:	5		
чистовое	$2.5 \cdot 10^{-6} \div 3 \cdot 10^{-5}$	$2,4 \cdot 10^{-9} \div 2,9 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-6} \div 7,6 \cdot 10^{-5}$
тонкое	$3,6 \cdot 10^{-4} \div 1,1 \cdot 10^{-5}$	$3.5 \cdot 10^{-8} \div 1.1 \cdot 10^{-9}$	$2,1\cdot 10^{-3} \div 2,1\cdot 10^{-5}$
Плоское шлифование:	10 10-7 1 10-4	5.5.10=12.1.10=8	0.7.10=8.1.10=4
обычное	$1.9 \cdot 10^{-7} \div 1 \cdot 10^{-4}$	$5.5 \cdot 10^{-12} \div 1 \cdot 10^{-8}$	$8.7 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-4}$
плосковершинное	$7.2 \cdot 10^{-6} \div 6.3 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-10} \div 6, 2 \cdot 10^{-8}$	$1,1 \cdot 10^{-5} \div 4,4 \cdot 10^{-3}$
Притирка:	$5.9 \cdot 10^{-8} \div 7.3 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-12} \div 7 \cdot 10^{-11}$	1.0. 10-8 5.4. 10-7
обычная			$1.9 \cdot 10^{-8} \div 5.4 \cdot 10^{-7}$
плосковершинная	$12 \cdot 10^{-6} \div 1, 2 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-10} \div 1, 2 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-4}$
	Наружные цили	ндрические поверхности	
Обтачивание:			
получистовое	$2.6 \cdot 10^{-4} \div 7.7 \cdot 10^{-3}$	$2.6 \cdot 10^{-8} \div 7.6 \cdot 10^{-7}$	$1,4 \cdot 10^{-3} \div 1,2 \cdot 10^{-1}$
чистовое	$5,2 \cdot 10^{-5} \div 8 \cdot 10^{-4}$	$5,1\cdot 10^{-9} \div 7,9\cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-4} \div 6,1 \cdot 10^{-3}$
Шлифование:			
чистовое	$7.6 \cdot 10^{-7} \div 3.4 \cdot 10^{-5}$	$7.5 \cdot 10^{-11} \div 3 \cdot 10^{-9}$	$5.7 \cdot 10^{-7} \div 9.1 \cdot 10^{-3}$
тонкое	$2,1 \cdot 10^{-7} \div 7 \cdot 10^{-6}$	$2,1 \cdot 10^{-11} \div 7 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-7} \div 1, 1 \cdot 10^{-5}$
плосковершинное	$7.3 \cdot 10^{-7} \div 5.7 \cdot 10^{-4}$	$7 \cdot 10^{-11} \div 5,6 \cdot 10^{-8}$	$5,4 \cdot 10^{-7} \div 3,8 \cdot 10^{-3}$
Притирка:			
обычная	$7,7 \cdot 10^{-8} \div 4,4 \cdot 10^{-6}$	$8 \cdot 10^{-12} \div 4 \cdot 10^{-10}$	$2,7 \cdot 10^{-8} \div 5,9 \cdot 10^{-6}$
плосковершинная	$3.5 \cdot 10^{-6} \div 2.4 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-10} \div 2,4 \cdot 10^{-8}$	$4,4 \cdot 10^{-6} \div 1,2 \cdot 10^{-3}$
Полирование:			
обычное	$2.8 \cdot 10^{-7} \div 9.7 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-11} \div 9,6 \cdot 10^{-9}$	$1.5 \cdot 10^{-7} \div 3.7 \cdot 10^{-4}$
плосковершинное	$3,4 \cdot 10^{-5} \div 1,2 \cdot 10^{-3}$	$3.3 \cdot 10^{-9} \div 1.2 \cdot 10^{-7}$	$9 \cdot 10^{-5} \div 1,1 \cdot 10^{-2}$
	Внутренние цили	индрические поверхности	
Растачивание:			
чистовое	$3.8 \cdot 10^{-6} \div 3.2 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-10} \div 3 \cdot 10^{-8}$	$4.8 \cdot 10^{-6} \div 1.8 \cdot 10^{-3}$
тонкое	$1,2 \cdot 10^{-7} \div 3,9 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-11} \div 3.8 \cdot 10^{-9}$	$5,1\cdot 10^{-8} \div 1,1\cdot 10^{-4}$
Шлифование:			
чистовое	$14,9 \cdot 10^{-7} \div 2,6 \cdot 10^{-5}$	$4.9 \cdot 10^{-11} \div 3 \cdot 10^{-9}$	$3,2 \cdot 10^{-7} \div 6,4 \cdot 10^{-5}$
тонкое	$1,6 \cdot 10^{-7} \div 5,3 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-11} \div 5 \cdot 10^{-10}$	$7.3 \cdot 10^{-8} \div 7.5 \cdot 10^{-6}$
плосковершинное	$2.9 \cdot 10^{-6} \div 3.8 \cdot 10^{-4}$	$3 \cdot 10^{-10} \div 3.7 \cdot 10^{-8}$	$3,4 \cdot 10^{-6} \div 3,2 \cdot 10^{-3}$
Притирка:			
обычная	$6.1 \cdot 10^{-9} \div 7.3 \cdot 10^{-7}$	$6 \cdot 10^{-13} \div 7 \cdot 10^{-11}$	$9 \cdot 10^{-10} \div 5,4 \cdot 10^{-7}$
плосковершинная	$7,7 \cdot 10^{-8} \div 1,2 \cdot 10^{-4}$	$7.6 \cdot 10^{-12} \div 1 \cdot 10^{-8}$	$2,7 \cdot 10^{-8} \div 4,8 \cdot 10^{-4}$

циональной дроби; C — отклонение оси шпинделя от перпендикулярности к направляющим станка; $L_{\rm p}$ — вылет резца; J — момент инерции сечения детали; Δ — биение оси шпинделя; X — расстояние от точки закрепления до точки обработки; K — коэффициент, учитывающий способ закрепления заготовки (при консольном закреплении в патроне K=3, при закреплении в центрах K=48, при закреплении в патроне с поджатием задним центром K=140).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Наукоемкие** технологии в машиностроении / А. Г. Суслов, Б. М. Базров, В. Ф. Безъязычный и др.; Под ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.

- 2. Суслов А. Г., Дальский А. М. Научные основы технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2002. 684 с.
- 3. **MP 42—82.** Метод определения нормальной контактной жесткости неподвижных стыков. Методические рекомендации. М.: ВНИИМАШ, 1982.
- 4. **Справочник** технолога-машиностроителя: в 2-х т. Т. 2 / Под ред. А. М. Дальского, А. Г. Суслова, А. Г. Косиловой, Р. К. Мещерякова. 5-е изд., исправ. М.: Машиностроение-1, 2003. 944 с.
- 5. **Прудников М. И.** Метод триботехнических испытаний цилиндрических поверхностей трения // Вестник Брянского ГТУ. 2008. № 2 (18). С. 48—56.
- 6. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко и др.; Под общ. ред. А. Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.

Проблемы теории и практики резания материалов

УДК 621.91.02

А. В. АНЦЕВ, канд. техн. наук, Н. И. ПАСЬКО, д-р техн. наук (ФГБОУ ВО "Тульский ГУ"), a.antsev@yandex.ru

Учет разброса периода стойкости при оптимизации режимов резания и профилактической замены инструмента

Рассматривается методика оптимизации режима резания и замены лезвийных инструментов на примере токарной обработки, учитывающая случайность процесса резания из-за разброса режущих свойств отдельных инструментов в одной партии и свойств обрабатываемости заготовок. Приведен пример расчета износа инструмента с использованием комплексной модели, показывающий, что правильный выбор скорости резания и периода замены инструмента с учетом разброса его стойкости позволяет существенно повысить производительность и экономичность процесса резания.

Ключевые слова: режущий инструмент, период стойкости, износ, комплексная модель изнашивания, скорость резания, период профилактики, оптимизация.

The method of optimization of cutting mode and replacement of blade tools on the example of turning, taking into account the randomness of the cutting process due to the variation of the cutting properties of individual tools in one batch and the workability properties of the billets, is considered. An example of calculating of tool wear using a complex model is given, showing that the correct selection of cutting speed and tool replacement period, taking into account the spread of its durability, can significantly increase the productivity and economy of the cutting process.

Keywords: cutting tool, durability period, wear, complex wear model, cutting speed, prevention period, optimization.

В современном машиностроении для оптимизации периода профилактики режущего инструмента и режимов резания традиционно используют лишь зависимость среднего периода стойкости режущего инструмента от режимов резания, не учитывающую стохастическую природу его износа. Однако период стойкости является случайной величиной с некоторой плотностью распределения f(t), обусловленной такими факторами, как разброс режущих свойств отдельных инструментов в одной партии, нестабильность режимов резания, вид обработки, твердость обрабатываемых деталей, величины припусков на обработку, предварительное напряжен-

но-деформированное состояние, вибрации, геометрические погрешности станка и др. [1-10]. При этом разброс периода стойкости режущего инструмента достаточно значителен — от 15 до 35 % [11], что негативно влияет на эффективность процесса резания и усложняет задачу оптимизации режимов резания. Для такой оптимизации необходимо знать не только плотность, но и зависимость параметров плотности от параметров режима резания (скорости резания V, подачи S, глубины h резания и др.). Далее под режущим инструментом будем понимать, прежде всего, резец и токарную обработку, хотя можно использовать и другие инструменты с учетом специфики оценки износа.

В качестве плотности использовали распределения f(t) без привязки к модели износа и разрушения режущего клина [12]: для веерной модели — логнормальное распределение [13]; для модели разрушения — распределение Вейбулла [14]; для модели накопления — распределение, связанное с нормальным распределением износа [14]; для комплексной [15, 16] и обобщенной [14] моделей — соответствующие комбинации упомянутых распределений. Вначале рассмотрим задачу оптимизации при произвольном распределении f(t), а затем числовой пример с комплексным распределением, учитывающим разбросы режущих свойств инструментов и свойств обрабатываемых заготовок.

Критерий оптимальности

В качестве критерия оптимальности принимаем удельные затраты, т. е. затраты на замену резца и возможный брак при работе отказавшим резцом, приходящиеся на одну обработанную деталь [17]. Таким образом, критерий оптимальности — это переменная составляющая себестоимости обработки или штучного времени технологического перехода, зависящая от режимов резания и замены инструмента. Рассмотрим два варианта замены.

В первом варианте резец заменяют после обработки g_Π деталей или времени t_Π резания. Если время резания одной детали $t_{\rm pes}$, то для g_Π деталей по-

лучим $t_{\Pi} = g_{\Pi}t_{\text{peз}}$. В этом случае удельные затраты Θ определяются так:

$$\Theta(V, S, h, g_{\Pi}) = \frac{Z_{o} + Z_{\bar{o}} + Z_{p}}{g_{\Pi}}, \qquad (1)$$

где $Z_{\rm o}$ — затраты собственно на обработку $g_{\rm II}$ деталей; $Z_{\rm p}$ — средние затраты на одну замену резца; $Z_{\rm o}$ — средние затраты на исправление или замену возможного брака за время обработки $g_{\rm II}$ деталей.

Во втором варианте контролируется состояние инструмента и его заменяют при достижении нормативно установленного предельного износа *L*. В этом случае удельные затраты зависят только от режима резания и выражаются формулой

$$\Theta(V, S, h) = \frac{Z_0 + Z_K + Z_p}{\bar{g}}, \qquad (2)$$

где \bar{g} — средний период стойкости обработанных деталей, шт.; $Z_{\rm K}$ — затраты на контроль состояния инструмента за этот период.

В этом случае предполагается, что при наличии контроля износа резца не должно быть брака из-за несвоевременной его замены, поэтому составляющая затрат $Z_6 = 0$ в равенстве (2) отсутствует.

Для расчета Z_6 в первом варианте и \bar{g} во втором варианте необходимо использовать данные о надежности резца. Если наработку резца в единицах времени резания обозначить t, то вероятность безотказной работы за это время составит $P(t) = \int_0^\infty f(t) dt$

отказной работы за это время составит $P(t) = \int_{t}^{t} f(t) dt$ (функция надежности [18]), а средний период стой-

кости в минутах времени резания —
$$\overline{T} = \int_{t}^{\infty} f(t)t dt =$$

$$= \int_{t}^{\infty} P(t) dt.$$

Средний период стойкости в штуках обработанных деталей составил $\bar{g}=\bar{T}/t_{\rm pes}$; среднее время безотказной работы за период t_{Π} наработки соста-

вило $\overline{T}_{\Pi}=\int\limits_{0}^{t_{\Pi}}P(t)\mathrm{d}t,$ а среднее время работы отказавшим (затупившимся) резцом за тот же период

определяется по формуле

$$\bar{\tau} = t_{\Pi} - \bar{T}_{\Pi}, \tag{3}$$

где t_{Π} — период профилактической замены режущего инструмента.

Затраты на брак пропорциональны числу обработанных деталей за время $\bar{\tau}$:

$$Z_{\bar{0}} = \bar{\tau} / t_{\text{pe}_3} C_{\bar{0}}, \tag{4}$$

где C_{6} — средние затраты на брак одной детали.

Время резания зависит от режима резания и, например, при точении вала диаметром D на длине l с подачей S оно определяется по формуле

$$t_{\text{pe3}} = \frac{\pi Dl}{1000 \, SV}.\tag{5}$$

Средние затраты на замену одного резца определяются по формуле $Z_{\rm p}=t_{\rm 3aM}C_{\rm cM}+C_{\rm U}/n_{\rm \Pi}$, где $t_{\rm 3aM}$ — средние затраты времени на замену инструмента; $C_{\rm cM}$ — себестоимость станко-минуты; $C_{\rm u}$ — цена инструмента; $n_{\rm II}$ — число переточек. При использовании сменной режущей пластины: $C_{\rm u}$ — цена пластины; $n_{\rm II}$ — число режущих граней.

При удельных затратах Θ времени средние затраты на одну замену резца составят $Z_{\rm p}=t_{\rm 3am}$. Если критерий оптимальности — удельные затраты времени, то $C_{\rm f}=c$, если рубли, то $C_{\rm f}=cC_{\rm cm}$, где c — средние затраты времени на брак одной детали на данном технологическом переходе.

Затраты на обработку пропорциональны числу g_{Π} обработанных деталей и определяются по формуле $Z_0 = t_{\text{pes}} g_{\Pi}$ или $Z_0 = t_{\text{pes}} g_{\Pi} C_{\text{CM}}$ в зависимости от единиц измерения затрат.

Затраты на контроль инструмента пропорциональны периоду стойкости и определяются по формуле $Z_{\rm K}=\bar{g}~C_{\rm K}$, если в минутах, или $Z_{\rm K}=\bar{g}~C_{\rm K}C_{\rm CM}$, если в рублях.

Если исходить из удельных затрат времени, то при оптимальных значениях V и g_{Π} получаем наибольшую производительность, а при затратах в рублях получаем минимальную себестоимость.

Коэффициент вариации наработки на отказ (мера разброса стойкости) определяется по форму-

ле
$$K_T=\sqrt{D_T}/\overline{T}$$
 , где $D_T=2\int\limits_0^\infty P(t)t\mathrm{d}t-\overline{T}^2$ — дисперсия наработки на отказ.

Комплексная модель износа режущего инструмента

Для оптимизации удельных затрат [см. формулы (1) и (2)] необходимо знать еще зависимость параметров распределения f(t) от режима резания. Рассмотрим подробнее комплексную модель износа [15, 16]. При этом комплексная функция надежности для резцов партии имеет вид:

$$P(t) = \int_{0}^{\infty} \psi(u) P_{u}(t) du, \qquad (6)$$

где $\psi(u)$ — плотность распределения интенсивности износа резцов в одной партии; u — средняя интенсивность износа одного резца; $P_u(t)$ — частная функция надежности одного резца со средней интенсивностью u износа.

Для плотности $\psi(u)$ распределения согласно работе [14] применяется логнормальное распределение:

$$\psi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_u u} \exp\left[-\frac{(\ln u - \ln \hat{U})^2}{2\delta_u^2}\right]. \tag{7}$$

Частная функция надежности $P_u(t)$ выражается через асимптотически нормальное распределение $\varphi_t(y)$ износа резца со средней интенсивностью u износа при времени резания t и обработке $g=t/t_{\rm pes}$ де-

талей. Так как суммарный износ резца $Y = \sum_{i=1}^{g} \Delta Y_i$,

то среднее значение этого износа $\overline{Y} = g\Delta Y = ut$, где $\Delta Y = Y/g$ — средний износ режущего инструмента на одной детали; u = Y/t — средняя интенсивность износа одного режущего инструмента. После обработки g деталей при предполагаемой статистической независимости ΔY_i дисперсия износа резца

 $D_Y = g D_{\Delta Y} = t \sigma_u^2$, где $D_{\Delta Y}$ — дисперсия приращений износа на каждой обработанной детали ΔY_i ; σ_u — квадратичное отклонение износа за единицу наработки (минуту резания). Если a — интенсивность износа на текущей детали при средней интенсивности по резцу $u = \bar{a}$ и коэффициенте вариации k_a , то σ_u определяется по формуле

$$\sigma_u = k_a u \sqrt{t_{\rm pes}}$$
.

Плотность распределения износа Y определяется по формуле

$$\varphi_t(y) \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi}t\sigma_u} \exp\left[-\frac{(y-ut)^2}{2t\sigma_u^2}\right].$$

Функция надежности $P_u(t)$ согласно работе [14] выражается через $\varphi_t(y)$:

$$P_{u}(t) = \int_{0}^{L} \varphi_{t}(y) dy \approx \Phi^{*} \left(\frac{L - ut}{\sigma_{u} \sqrt{t}} \right),$$
 (8)

где $\Phi^*(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) dx$ — нормированное

нормальное распределение.

Комплексная функция (6) надежности с учетом равенств (7) и (8) зависит от четырех параметров L, \hat{U} , δ_u , k_a .

Параметр L определяет максимально допустимый износ резцов (нормативный износ), по достижению которого резец считается отказавшим и работа с таким резцом приводит к браку, затраты на исправление которого пропорциональны времени $\bar{\tau}$ работы таким инструментом [см. формулы (3) и (4)].

Среднегеометрическая интенсивность \hat{U} износа резцов в партии определяется по формуле

$$\hat{U} = \exp(\overline{\ln U}),$$

где $\overline{\ln U} = \int\limits_0^\infty \psi(u) \ln(u) \mathrm{d}u$ и существенно зависит от

режима резания. Такую зависимость целесообразно представить в виде [19]:

$$\hat{U}(V, S, h, HB) = \exp(b_0 + b_1 \ln V + b_2 \ln^2 V + b_3 \ln^3 V + b_4 \ln S + b_5 \ln h + b_6 \ln(HB/200)).$$

Эта форма представления обобщает применяемую на практике степенную зависимость и удобна тем, что после логарифмирования она становится линейной относительно коэффициентов b_0 , ..., b_6 , что облегчает оценку этих коэффициентов из опыта методом наименьших квадратов в логарифмической системе координат. Коэффициенты b_2 и b_3 позволяют учесть нелинейный характер зависимости периода стойкости от скорости резания.

Квадратичное отклонение δ_u логарифма интенсивности износа резцов определяется по формуле

$$\delta_u^2 = \overline{\ln^2 U} - (\overline{\ln U})^2,$$

где $\overline{\ln^2 U} = \int\limits_0^\infty \psi(u) \ln^2(u) \mathrm{d}u$, и характеризует разброс

режущих свойств резцов в одной партии и однозначно связан с коэффициентом вариации износа

резцов
$$K_u = \sqrt{\exp(\delta_u^2) - 1}$$
.

Коэффициент k_a характеризует разброс свойств обрабатываемых заготовок, например, припуска и твердости заготовок [14]. Если δ_h и δ_{HB} — квадратичные отклонения логарифмов припуска и твердости заготовок, то их квадратичное отклонение интенсивности износа определяется как δ_a =

=
$$\sqrt{b_5^2 \delta_h^2 + b_6^2 \delta_{HB}^2}$$
, а коэффициент $k_a = \sqrt{\exp(\delta_a^2) - 1}$.

Предполагается, что износ резцов идет по модели накопления [14] при $\delta_u=0$, по веерной модели при $k_a=0$, а при $\delta_u=0$ и $k_a=0$ имеет место детерминированная модель износа без разброса стойкости.

Удельные затраты Θ с увеличением подачи S и глубины h резания убывают, поэтому при оптимизации их следует брать по максимуму, исходя из технологических и других ограничений. Например, подачу следует назначать, исходя из требуемой шероховатости обработки, а глубину резания, исходя из величины припуска на обработку с учетом максимальной мощности привода главного движения. Что касается скорости резания, то при технологических и конструктивных ограничениях станка существует, как правило, оптимальная скорость резания, сводящая к минимуму удельные затраты.

Пример оптимизации

Оптимальные значения V и g_{Π} можно определять различными методами. В приведенном в данной работе примере использовали метод перебора значений V и g_{Π} с малым шагом. Метод прост при программировании в связи с возможной многоэкстремальностью функции $\Theta(V,g_{\Pi})$.

Для оптимизации использовали следующие исходные данные: подача — $0,15\,$ мм/об, глубина резания — $0,35\,$ мм, твердость обрабатываемого материала — $150\,$ HB, длина обработки — $100\,$ мм, диаметр обработки — $50\,$ мм, затраты на исправление брака детали — $20\,$ мин, затраты на контроль износа — $0,5\,$ мин, затраты на замену инструмента и подналадку — $5\,$ мин, стоимость станкоминуты — $100\,$ руб., стоимость режущей пластины — $300\,$ руб., число режущих граней пластины — $4.\,$

При этих исходных данных стойкостная зависимость $\hat{U}(V, S, ...)$ получена с использованием данных работ [19, 20]. Коэффициенты: $b_0 = 44,60$; $b_1 = -22,06$; $b_2 = 2,75$; $b_3 = 0$; $b_4 = 1,33$; $b_5 = 1,2$ и $b_6 = 10$.

Полученная зависимость $\overline{T}(V)$ среднего периода стойкости от скорости резания приведена на рис. 1. Зависимость $\overline{T}(V)$ имеет максимум периода стойкости при скорости, близкой к V=70 м/мин. Оптимальные по производительности или себестоимости значения скорости резания достигаются, как правило, при больших значениях.

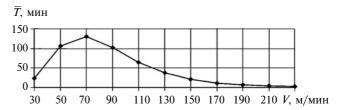


Рис. 1. Зависимость среднего периода T стойкости от скорости V резания

На рис. 2 приведены зависимости удельных затрат от скорости резания для трех составляющих затрат и в целом при оптимальном периоде замены g_Π для каждой скорости. Общие удельные затраты $\Theta = \Theta_0 + \Theta_6 + \Theta_p$, а их составляющие: $\Theta_0 = Z_0/g_\Pi$; $\Theta_0 = Z_0/g_\Pi$; $\Theta_0 = Z_0/g_\Pi$.

В табл. 1 и 2 приведены результаты оптимизации при разных значениях коэффициентов вариации K_u и k_a и затратах, измеряемых в минутах рабочего времени и в рублях.

В табл. 1 приведены результаты оптимизации скорости V резания и периода g_{Π} профилактической замены инструмента при разных значениях коэффициентов K_u и k_a . Процент брака рассчиты-

вали по формуле $P_{\bar{0}} = 100 \frac{\bar{\tau}}{t_{{
m pe}_3} g_{_\Pi}}$ с учетом формул

(3) и (5), а коэффициент использования стойкости

$$K_{\rm MC} = \frac{g_{\rm II}t_{\rm pe3} - \bar{\tau}}{\bar{T}}.$$

Taблица Результаты оптимизации скорости V резания и периода g_{Π} замены резца при разных значениях коэффициентов разброса K_u и k_a

Параметр	Затраты, мин (числитель) / руб. (знаменатель)						
Коэффициент K_u	0/0	0/0	0,3/0,3	0,3/0,3			
Коэффициент k_a	0/0	1,0/1,0	0/0	1,0/1,0			
Период замены g_{Π} , шт.	26/32	26/32	21/27	27/27			
Скорость резания V , м/мин	141/134	141/134	122/113	113/113			
Период стойкости Т, мин	20/26	19,8/25,4	40,4/55,4	55,9/55,9			
Коэффициент K_T	0/0	0,195/0,177	0,301/0,229	0,325/0,325			
Время резания t_{pe3} , мин	0,74/0,78	0,74/0,78	0,86/0,93	0,93/0,93			
Удельные затраты [⊙]	0,94/96,1	0,935/96,1	1,136/116,8	1,162/119,0			
Брак, %	0/0	0/0	0,2/0,1	0,3/0,3			
Коэффициент использования стойкости	1,0/1,0	0,977/0,983	0,446/0,451	0,447/0,447			

Tаблица 2 Результаты оптимизации скорости резания V при замене по отказу резца при разных значениях коэффициентов разброса K_u и k_a

Параметр	Затраты, мин (числитель) / руб. (знаменатель)						
Коэффициент K_u	0/0	0/0	0,3/0,3	0,3/0,3			
Коэффициент k_a	0/0	1,0/1,0	0/0	1,0/1,0			
Скорость резания V , м/мин	139/136	139/136	143/138	141/138			
Период стойкости, Т, мин	20,5/23,5	21,2/23,7	19/22,7	20,6/23			
Коэффициент K_T	0/0	0,190/182	0,297/0,300	0,351/0,347			
Время резания $t_{\text{peз}}$, мин	0,75/0,77	0,75/0,77	0,73/0,76	0,74/0,76			
Удельные затраты Θ	1,434/146	1,434/146	1,425/145,1	1,423/144,0			

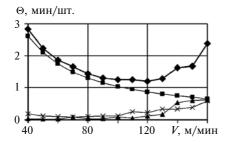


Рис. 2. Зависимости удельных затрат Θ от скорости V резания при оптимальном периоде g_{Π} замены инструмента:

◆ — общие затраты;
 ■ — затраты на обработку;
 ▲ — затраты на исправление или замену брака;
 × — затраты, связанные с заменой инструмента

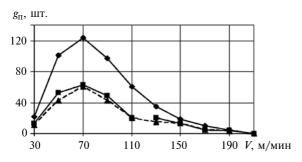


Рис. 3. Зависимости оптимального периода g_{Π} замены инструмента от скорости V резания при разных значениях коэффициентов K_u и k_a :

•
$$-K_u = 0$$
, $k_a = 0$; ■ $-K_u = 0,3$, $k_a = 0$; $\blacktriangle - K_u = 0,3$, $k_a = 1,0$

В табл. 2 приведены результаты оптимизации скорости резания при замене инструмента при достижении предельного износа L=0.4 мм.

Выводы

Результаты расчета, представленные на рис. 2 и 3 и в табл. 1, показывают, что правильный выбор скорости резания и периода замены инструмента с учетом разброса стойкости позволяет существенно повысить производительность и экономичность процесса резания. Например, если V = 141 м/мини $g_{\rm II} = 26$ шт. рассчитаны без учета разброса стойкости, т. е. при $K_u = 0$ и $k_a = 0$, то удельные затраты составляют всего 0,94 мин/шт., а с учетом разброса при $K_u = 0,3$ и $k_a = 1,0$ они возрастают до 3,35 мин/шт. При таком разбросе получим оптимальные значения: V = 113 м/мин, $g_{\Pi} = 27$ шт., а удельные затраты составят $\Theta = 1,162$ мин/шт., т. е. при правильном выборе скорости резания и периода замены инструмента удельные затраты удается снизить на 65,31 %. Если затраты измерять в рублях, то при расчете без учета разброса получим V=134 м/мин, $g_\Pi=32$ шт. и $\Theta=96,1$ руб., но при тех же V и g_Π с учетом разброса получим $\Theta = 317,7$ руб./шт. Оптимальные значения V, g_{Π} и Θ с учетом разброса составляют: V = 113 м/мин, $g_{\Pi} = 27$ шт., $\Theta = 119$ руб./шт. Таким образом, учет разброса в данном примере позволяет снизить удельные затраты на 198,7 руб./шт.

Во втором варианте замены резцов (при работе до отказа) удельные затраты зависят только от средней наработки \bar{g} на отказ и не зависят от коэффициентов вариации K_u и k_a , что подтверждают данные табл. 2.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Конструкторское** и технологическое обеспечение точности обработки на станках с гибридной компоновкой / А. Г. Ивахненко, В. В. Куц, А. В. Олейник и др. // Известия Юго-Западного ГУ. Серия: Техника и технологии. 2014. № 4. С. 15—22.
- 2. **Аникеева О. В., Ивахненко А. Г., Куц В. В.** Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 2 (298). С. 159—164.
- 3. **Аникеева О. В., Ивахненко А. Г., Пузанов В. Е.** Построение моделей схемно-параметрической надежности металлорежущих станков // Известия Юго-Западного ГУ. 2013. № 5 (50). С. 148—155.
- 4. **Егоров С. А., Обронов М. С.** Влияние парообразных смазочно-охлаждающих технологических средств на износ режущего инструмента // Вестник машиностроения. 2018. № 1. С. 82—84.
- 5. **Уткин Е. Ф.** Оценка влияния деформационных процессов в контактируемых зонах обрабатываемого и инструментального материалов на износ режущего инструмента // Известия Волгоградского ГТУ. 2007. № 3 (29). Т. 1. С. 132—134.
- 6. **Исследование** влияния разных СОЖ на интенсивность изнашивания режущей кромки токарного инструмента при обработке стали 12X18H10T / А. Г. Кисель, К. В. Аверков, Д. С. Макашин и др. // Вестник машиностроения. 2018. № 3. С. 85, 86.
- 7. **Влияние** механизма контактного взаимодействия на износ передней поверхности инструмента / Ю. Н. Полянчиков, С. М. Пахтусов, В. А. Солодков и др. // Известия Волгоградского ГТУ. 2004. № 9. С. 42—44.
- 8. Дерябин И. П., Миронова И. Н. Исследование стойкости режущих пластин разных производителей при обработке титановых сплавов // Вестник машиностроения. 2018. № 10. С. 82, 83.
- 9. **Пегашкин В. Ф., Пегашкин Е. В., Пищевская Е. С.** Математическая модель стойкости режущего инструмента в условиях нечетких множеств // Вестник машиностроения. 2017. № 2. С. 70—72.
- 10. Липатов А. А. Исследование адгезионных сколов твердосплавного инструмента при точении аустенитной стали // Вестник машиностроения. 2016. № 7. С. 69—73.
- 11. **Мартинов Г. М., Григорьев А. С.** Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработ-ки // СТИН. 2012. № 12. С. 23—27.
- 12. Кацев П. Г. Статистические методы исследования режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1968. 156 с.
- 13. **Веерная** модель износа режущего инструмента и оптимизация режима профилактики / Н. И. Пасько, А. В. Анцев, Н. В. Анцева, С. В. Сальников // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 12: в 2 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 119—130.
- 14. **Обобщенная** стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н. И. Пасько, А. В. Анцев, Н. В. Анцева, С. В. Сальников. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 174 с.

Е. А. КУДРЯШОВ, И. М. СМИРНОВ, доктора технических наук, Д. В. ГРИШИН (АО "Научно-исследовательский инженерный институт", г. Балашиха, Московская область), e-mail: kea-swsu@mail.ru

Обоснование выбора рациональной формы сменной многогранной пластины токарного резца

Рассматриваются выбор формы сменной многогранной пластины с рекомендуемой геометрией режущего элемента из инструментального материала, удовлетворяющего требованиям прерывистого точения, и профилирование передней поверхности резца, позволяющее интенсифицировать режим обработки.

Ключевые слова: прерывистое точение, режущий элемент, качество обработки, профилирование.

The selection of the shape of a replaceable multifaceted plate with a recommended cutting element geometry from tool material that meets the requirements of intermittent turning, and profiling of the front surface of the tool, allowing to intensify the machining mode is considered.

Keywords: intermittent turning, cutting element, processing quality, profiling.

Существующая в мировой практике тенденция совершенствования сборных конструкций лезвийного инструмента применением сменных многогранных пластин (СМП) из различных инструментальных материалов (ИМ) дает новое развитие разным видам обработки резанием поверхностей сложного профиля, в том числе и прерывистому точению [1].

Инструментальной отраслью освоено производство СМП, имеющих форму многогранников разных размеров и точности. Поперечное сечение пластины может иметь простую прямоугольную форму как с плоскими, так и с криволинейными передними поверхностями, вплоть до сложной формы — с отверстиями, выточками и иной конфигурацией. При конструировании передней поверхности необходимо учитывать сочетание рациональных значений переднего угла и формы вершины режущего элемента (РЭ) со сложностью обрабатываемой поверхности заготовки (табл. 1).

Практика показала, что при точении сложного профиля рекомендуемые в табл. 1 формы вершины и передней поверхности РЭ оказываются малоэффективными (поз. 1 и 3). Для условий прерывистого точения геометрия РЭ (поз. 2 и 4) более приемлема, поэтому ведущие производители режущего инструмента для повышения стойкости и предотвращения преждевременного скалывания режущей кромки выполняют разного вида фаски (рис. 1) [2-4]. Повысить прочность режущей кромки позволяет выбор СМП с увеличенным углом ε при вершине РЭ (табл. 2). Появляется возможность назначения более высокой подачи, но при этом возрастает вероятность возникновения вибраций [5, 6]. Следовательно, для благоприятного распределения сил прерывистого точения для режущей кромки необходимо задавать больший радиус скругления и меньшие значения переднего и заднего углов.

Возможны два вида контакта СМП с обрабатываемой поверхностью: острой вершины инструмента с элементами разрыва обрабатываемой поверхности (рис. 2, a); режущей кромки с прерывистой поверхностью заготовки — "шабрящий эффект" (рис. 2, δ).

Из этих двух вариантов нежелательным является контакт, при котором острая вершина инструмента, встречаясь с элементами разрыва обрабатываемой поверхности (см. рис. 2, a), имеет высокую вероятность разрушения вследствие ударной нагрузки на хрупкую вершину СМП [5, 7].

В технической литературе назначение передней поверхности РЭ рассматривается как одно из средств обеспечения надежной работы станков, например, с целью дробления и отвода стружки из зоны резания, что является лишь частью проблемы сохранения стойкости СМП. В нашей работе в связи с прерывистым характером точения поверх-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 72)

- 15. **Пасько Н. И., Анцев А. В.** Комплексная модель износа режущего инструмента и пример ее применения для оптимизации режима профилактики // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 11: в 2 ч. Ч. 1. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 192—202.
- Изд-во ТулГУ, 2015. С. 192—202. 16. **Antsev A. V., Pas'ko N. I., Antseva N. V.** Assessment of wear dependence parameters in complex model of cutting tool wear // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. № 327. 042005. DOI: 10.1088/1757-899X/327/4/042005.
- 17. Пасько Н. И., Анцев А. В. Оптимизация плановопредупредительной замены режущего инструмента по
- данным об износе и наработке // Известия ТулГУ. Технические науки. Вып. 5-2. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. С. 257-265.
- 18. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А. Д. Математические методы теории надежности. М.: Наука, 1985. 524 с.
- 19. **Анцев А. В., Пасько Н. И.** Оценка стойкостной зависимости методом максимального правдоподобия // Известия ТулГУ. Технические науки. 2017. Вып. 8. Ч. 2. С. 129—138.
- 20. **Хает Г.** Л. Прочность режущего инструмента. М.: Машиностроение, 1975. 166 с.

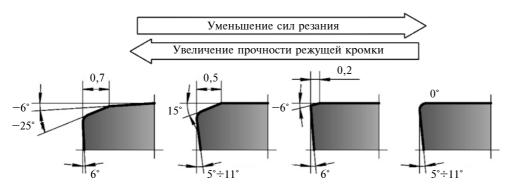


Рис. 1. Геометрия РЭ из композита фирмы SECO TOOLS (Швеция)

Рис. 2. Варианты контакта СМП с элементами разрыва обрабатываемой поверхности заготовки

ностей сложного профиля дроблению и удалению стружки уделялось гораздо меньше внимания. Акцент исследования был сделан на сохранении стой-

Tаблица 1 Рекомендации по выбору формы передней поверхности СМП [4, 5]

Форма перед- ней по- верхно- сти	Эскиз режущей части пластины	Рекомендуе- мые к обработ- ке материалы
1. Пло- ская с положи- тельным передним углом	α	Серый чугун и другие хрупкие материалы
2. Пло- ская с положи- тельным перед- ним уг- лом и от- рицатель- ной фаской	h α α γ	Ковкий чугун, сталь $\sigma_{\text{B}} \leq 800 \text{ H/mm}^2,$ при обработке в условиях нежесткой технологической системы
3. Пло- ская с от- рицатель- ным пе- редним углом	h a a + 2°	Сталь $\sigma_{B} = 800 \text{ H/мм}^{2}$, при обработке с ударами в условиях жесткой технологической системы
4. Криво- линей- ная с от- рицатель- ными пе- редним углом и фаской	α	Коррозион- но-стойкая сталь, $\sigma_{\rm B} = 850~{\rm H/mm}^2$

кости ИМ. В этом случае значение передней поверхности должно быть гораздо шире.

Рассмотрим профиль передней поверхности как множество точек вероятного контакта с обрабатываемой поверхностью, причем чем дальше от хрупкой вершины инструмента будет находиться точка (область) контакта, тем благоприятнее для сохранения стойкости ИМ произойдет врезание РЭ в прерывистую поверхность заготовки.

Условием сохранения стойкости ИМ будет правильное геометрическое построение профиля арки циклоиды качением окружности, диаметр которой равен удвоенной заданной глубине резания. Множество точек вероятного контакта на поверхности арки циклоиды, начиная от вершины СМП по направлению к ее центру, формирует криволинейный вогнутый профиль передней поверхности РЭ, образуя передний (отрицательный) угол γ (рис. 3).

Для определения точки (участка) оптимального контакта передней поверхности проходного резца с заготовкой криволинейный профиль передней по-

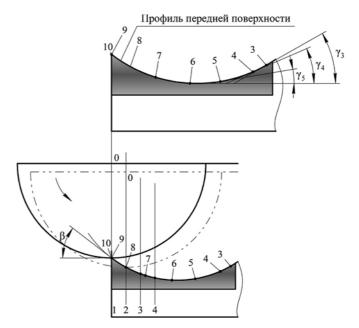
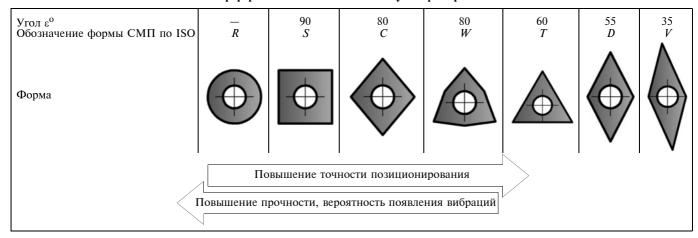


Рис. 3. Схема формирования профиля передней поверхности СМП



верхности РЭ нужно разделить на *п* равных участков, каждый из которых соответствует определенному количественному показателю прерывистости, т. е. отношению площади разрыва к общей площади обрабатываемой поверхности [8]. В нашем примере степень прерывистости составляет 70 %, что равнозначно положению точки (участка) *5* на профиле передней поверхности РЭ (см. рис. 3).

Оптимальное положение передней поверхности СМП относительно заготовки обеспечивается ее установкой на державке резца под углом $\gamma_5 = -8^\circ$ и разворотом пластины относительно обрабатываемой поверхности на расчетный угол β (см. рис. 3) и определяется по формуле

$$tg\beta = \frac{l\sqrt{b-\Delta a^2} - \Delta a\sqrt{b-l^2}}{l\Delta a + \sqrt{b-l^2}\sqrt{b-\Delta a^2}},$$

где l — длина участка спиральной поверхности; $b = \Delta r - \Delta t$; Δt — изменение глубины резания вследствие колебания величины припуска; $\Delta a = a_1 - a$ — смещение вершины РЭ вследствие погрешности настройки на заданное положение; $\Delta r = r_{\rm max} - r_{\rm min}$ — перепад высот микропрофиля спиральной поверхности, обработанной точением.

В настроенном положении инструмента в результате перераспределения ударной нагрузки прерывистого резания обеспечивается целостность СМП и уменьшается сила трения стружки о переднюю поверхность, что создает запас работоспособности инструмента [9, 10].

Выводы

При демпфировании вибрационных нагрузок прерывистого резания совмещение в конструкции проходного резца лучшего по физико-механическим характеристикам ИМ с передней поверхностью РЭ СМП, имеющей циклоидальный профиль, расширяет возможности инструментального обеспечения точения поверхностей сложного профиля, при этом:

- 1) при циклических ударных нагрузках прерывистого резания работоспособность ИМ группы композитов превосходит работоспособность известных материалов, применяемых для аналогичных целей;
- 2) циклоидальный профиль передней поверхности РЭ СМП позволяет выполнять точение сложных поверхностей на больших режимах резания с заданной точностью обработки и производительностью.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Инструментальщик:** Энциклопедический справочник-каталог / Я. А. Музыкант, Я. Арпаз, М. А. Волосова и др.: в 3 т. Т. 1. М.: Наука и технологии, 2009. 464 с.
- 2. Андреев В. Н., Боровский Г. В., Григорьев С. Н. Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания. М.: Машиностроение, 2010. 480 с.
- 3. **Özel T.** Modeling of hard part machining: effect of insert edge preparation in CBN cutting tools // Journal of Materials Processing Technology. 2003. V. 141. N. 2. P. 284—293.
- 4. **Grzesik W., Żak K., Chudy R.** Influence of tool nose radius on the cutting performance and surface finish during hard turning with CBN cutting tools // Journal of Machine Engineering. 2017. V. 17. N. 2. P. 56—64.
- 5. **Ståhl J. E.** Metal cutting. Theores and models // Lund. Sweden: SECO TOOLS. 2012. 580 p.
- 6. **Городецкий Ю. Й., Буданков А. С., Комаров В. Н.** Об одной системе для экспериментального исследования динамики процесса резания металла // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2008. № 1. С. 80—86.
- 7. **Zhou J.** Mechanical load identification for spontaneous tool failure monitoring // Lund University. Sweden. 1996. 178 p.
- 8. **Improved** Tools for the Turning of Complex Surfaces / E. A. Kudryashov, I. M. Smirnov, E. I. Yatsun, E. V. Pavlov // Russian Engineering Research. 2018. V. 38. P. 223—228.
- 9. **Кудряшов Е. А., Смирнов И. М.** Создание рациональных условий хрупким сверхтвердым режущим элементам для точения поверхности из разнородных конструкционных материалов // Изв. вузов. Машиностроение. 2018. № 2 (695). С. 75—85.
- 10. **Kudryashov E. A., Smirnov I. M.** Tool guarantee of intermittent cutting processes // Manufacturing Technology. 2017. V. 17. P. 887—892.

ВОПРОСЫ ЭКОЛОГИИ И БЕЗОПАСНОСТИ

УДК 621.43

Ю. С. ВАСИЛЬЕВ, акад. РАН, д-р техн. наук (Санкт-Петербургский государственный политехнический университет Петра Великого), В. А. ЛИХАНОВ, д-р техн. наук, О. П. ЛОПАТИН, канд. техн. наук (Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров), e-mail: interserv@spbstu.ru, lihanov.va@mail.ru, nirs vsaa@mail.ru

Улучшение экологических показателей мобильных теплоэнергетических установок при работе на альтернативных топливах

Для улучшения экологических показателей мобильных теплоэнергетических установок рассматривается возможность использования альтернативных энергоносителей: природный газ, метаноло- и этанолотопливные эмульсии и метиловый эфир рапсового масла.

Ключевые слова: энергетическая установка, природный газ, метанол, этанол, эмульсия, рапсовое масло, концентрация.

To improve the environmental performance of mobile thermal power plants, the use of alternative energy sources is being considered: natural gas, methanol and ethanolfuel emulsions and rapeseed oil methyl ether.

Keywords: power plant, natural gas, methanol, ethanol, emulsion, rapeseed oil, concentration.

Энергетические и экологические проблемы обусловливают необходимость внедрения энергосберегающих технологий и использования альтернативных источников энергии в силовых установках, которые в настоящее время являются основными потребителями нефтяных топлив. В отработавших газах (ОГ) двигателей внутреннего сгорания транспортных средств содержится более двухсот различных компонентов, большинство из которых являются вредными веществами и загрязняют окружающую среду. Поэтому с каждым годом нормы по содержанию вредных веществ в ОГ ужесточаются, а производители мобильных теплоэнергетических установок (ТЭУ) уже на этапе проектирования закладывают ограничения по вредным веществам при эксплуатации своего изделия. При этом продолжаются исследования по замене нефтяных топлив более экологичными энергоносителями [1]. Сегодня ведутся работы по созданию мобильных ТЭУ, работающих на природном газе (ПГ), биотопливе на основе спиртов (метилового, этилового, бутилового и др.), растительных маслах (рапсовом, подсолнечном, соевом, арахисовом, пальмовом) и их производных [2].

Основным компонентом ПГ является метан (СН₄), который имеет высокий потенциал для улучшения экологических показателей мобильных ТЭУ. Его ресурс в мире значительно превышает ресурс нефтяного топлива. Он дешевле дизельного топлива (ДТ) и обеспечивает меньшую концентрацию вредных веществ в ОГ. Природный газ используют не только в качестве моторного топлива для мобильных ТЭУ, он может служить сырьем для производства синтетических энергоносителей, получаемых его окислением в присутствии катализатора. В результате получают так называемый синтез-газ, содержащий существенно меньше полиароматических компонентов по сравнению с дизельным нефтяным топливом, поэтому он сгорает в ТЭУ практически без образования сажи [3].

Концептуальный подход при переводе мобильной ТЭУ на ПГ зависит от состояния газа (жидкое или газообразное) и способов смесеобразования и воспламенения рабочей смеси. Наиболее распространенный способ конвертирования дизельных силовых установок на ПГ заключается в двухэтапном смесеобразовании. На первом этапе образуется смесь, близкая к гомогенной, на втором этапе смесь близка к гетерогенной. Через впускную систему в цилиндр подводится окислитель и ПГ в виде гомогенной смеси, которая сжимается. В конце сжатия в эту высокотемпературную смесь впрыскивают запальную порцию ДТ, образовавшаяся гетерогенная смесь самовоспламеняется [4].

Перспективными для мобильных ТЭУ являются одноатомные первичные спирты — метанол ($\mathrm{CH_3OH}$) и этанол ($\mathrm{C_2H_5OH}$). Преимущество метанола заключается в наличии в молекуле атома кислорода, что позволяет использовать его в качестве оксигената (кислородсодержащий компонент), снижающего концентрацию сажи и CO в продуктах сгорания. Использование спиртов в качестве энергоносителей мобильных ТЭУ может значительно снизить выбросы сажи и оксидов азота в окружающую среду, так как при горении спирта в камере сгорания силовой установки образуется меньше

(относительно ДТ) промежуточных продуктов, способствующих зарождению ацетиленовых и ароматических углеводородов, которые и приводят к образованию сажи. Кроме того, при сгорании метанола и этанола в ОГ значительно меньше соединений серы. Спирт с более простой структурой и незначительными размерами молекул обеспечивает более "чистое" сгорание топлива [5].

Стоимость метанола по сравнению с другими альтернативными энергономителями невысока. Однако есть один недостаток — большая теплота испарения (1104 кДж/кг) при низкой температуре кипения, которая для штатного ДТ составляет 250 кДж/кг. Это приводит к охлаждению воздушного заряда вследствие испарения спирта при низких цетановых числах и высоких температурах самовоспламенения и является причиной плохого воспламенения в камере сгорания. Поэтому воспламенение метанола в таких условиях возможно при дополнительном источнике воспламенения с подачей метанола на впуске при использовании катализаторов, снижающих температуру воспламенения метанола и ускоряющих реакцию горения.

Также для эффективного воспламенения метанола в камере сгорания можно использовать подачу запальной порции штатного ДТ.

Для улучшения воспламенения спиртов используют двойные системы топливоподачи, которые одновременно с подачей спирта осуществляют и подачу запальной порции ДТ [6].

Перспективными альтернативными топливами являются также биотоплива и их смеси с ДТ в разных пропорциях (растительно-минеральные смеси). Растительные масла представляют собой смесь триглицеридов (эфиров), соединенных с молекулой глицерина. Глицерин повышает вязкость и плотность растительного масла. Таким образом, основная задача при получении биотоплива — удаление глицерина путем замещения его спиртом. Сегодня альтернативные энергоносители из рапсового масла применяют в натуральном виде, а также в виде метилового и диметилового эфиров рапсового масла [7].

Метиловый эфир рапсового масла (МЭРМ) меньше закоксовывает детали силовых установок по сравнению с этиловым эфиром рапсового масла, так как имеет более низкие вязкость и молекулярную массу. К тому же метиловые эфиры луч-

ше сохраняются, снижают дымность и температуру ОГ, менее агрессивны к деталям двигателя. При очистке биотоплива от излишков спирта возникают трудности, поскольку этиловый спирт формирует устойчивую водную эмульсию. Поэтому необходимо повысить экологичность его производства. Следовательно, при более низкой себестоимости метанола производство МЭРМ рентабельнее, поэтому его все чаще используется в Европе в качестве альтернативного энергоносителя [8, 9].

Физико-химические свойства альтернативного энергоносителя обусловливают применение соответствующих технологий, обеспечивающих требуемые эксплуатационные, экономические и экологические показатели. При производстве биотоплива применяют растительные масла: рапсовое, льняное, подсолнечное, пальмовое и др. Получаемые из них биотоплива отличаются по таким показателям, как низшая теплота сгорания, кинематическая вязкость, плотность, температура самовоспламенения, цетановое число и др. (таблица) [10].

В Вятской государственной сельскохозяйственной академии на кафедре "Тепловые двигатели, автомобилей и тракторов" в научно-исследовательской лаборатории испытаний ТЭУ была создана экспериментальная база для исследования работы дизеля 4Ч 11,0/12,5 на ПГ, метаноло-топливной эмульсии (МТЭ) и этаноло-топливной эмульсии (ЭТЭ) [11] и дизеля 24 10,5/12,0 на метаноле и МЭРМ [12].

Экспериментальная база включает в себя электротормозной стенд SAK-N670 с балансирным маятниковым механизмом, ТЭУ и измерительную аппаратуру (рис. 1).

Эмульсии приготовляли в гомогенизаторе MPW-302 при частоте вращения вала 2000 мин⁻¹ (рис. 2). Отбор проб ОГ осуществляли газозаборниками автоматической системы газового анализа (АСГА-Т), которые были установлены в выпускном трубопроводе дизеля. Дымность ОГ измеряли с помощью дымомера BOSCH-EFAW-68A [13].

При испытаниях дизеля 4411,0/12,5, работающего на ПГ, использовали 80% газа и 20% ДТ для запала [14, 15].

На рис. 3 и 4 представлены результаты исследований на дымность и концентрацию токсичных веществ в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 мобильной ТЭУ соответственно от частоты вращения вала и нагрузки

Показатели физико-химических свойств биотоплива и дизельного топлива

Топливо	Плотность при $T = 20^{\circ}\text{C}$, кг/м ³	Кинематическая вязкость при $T = 20$ °C, $\text{мм}^2/\text{c}$	Низшая теплота сгорания, МДж/кг	Цетановое число	Температура самовоспламенения, °С
Метанол	791÷792	0,73	19,7	3	464
Этанол	789	1,51	26,8	8	Не менее 404
Рапсовое масло	877	80	36,7	44	318
МЭРМ	860÷900	12	37,2	51	230
Дизельное топливо	863	3÷6	42,5	45	250



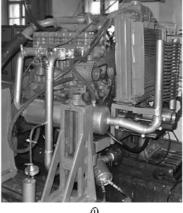


Рис. 1. Электротормозной стенд SAK-N670 (a) и установленная на нем силовая установка 4Ч 11,0/12,5 (б)

при работе на разных $\Pi\Gamma$, в том числе, с рециркуляцией $O\Gamma$ ($PO\Gamma$).

Анализ показал, что зависимости концентрации токсичных компонентов в ОГ при работе на газодизельном топливе от частоты п вращения вала близки к зависимостям, полученным при использовании ДТ. При применении ПГ в диапазоне частот $n = 1400 \div 2400 \text{ мин}^{-1}$ наблюдается снижение концентрации в ОГ сажи на 83,6÷88,7 %; CO — на $20,8 \div 65,5 \%$; CO₂ — на 47,0÷49,4 %, однако повышаются концентрации NO_x на 23,5÷25,9 % и CH_x на 75,0÷85,3 %. Для снижения оксидов азота на газодизельном топливе применили РОГ. При работе на газодизельном топливе с 10 % РОГ концентрация NO_x практически соответствовало при работе на ДТ, а при 20 % РОГ концентрация NO_x снизилась на 30÷30,1 %, сажи — на 82÷88,7 %; CO — на 0,1÷51,7 %; CO₂ — на 31,6÷35,6 %.

Применение ПГ в дизеле 4Ч 11,0/12,5 мобильной ТЭУ приводит к повышению концентрации NO_x и CH_x в ОГ (см. рис. 4), а применение РОГ снижает концентрацию NO_x в ОГ во всем диапазоне нагрузок. Так, при 40 % РОГ в диапазоне нагрузок $F=0,13\div0,26$ МПа концентрация N O x снижается до 55 %, а при работе на газодизельном топливе с 20 % РОГ на номинальном режиме ($p_e=0,64$ МПа) концентрация NO_x в ОГ ниже на 31,8 %, чем при использовании ДТ. Применение 10 % РОГ снижает концентрацию CH_x на 9,9 % относительно газодизельного топлива без РОГ. Значительное повышение CH_x при больших нагрузках обусловлено неполным сгоранием топлива в условиях недостатка окислителя с увеличением РОГ.

Газодизельное топливо существенно снижает концентрацию в ОГ сажи и CO_2 . Так, на номинальном режиме применение газодизельного топлива с 20 % РОГ снижает в ОГ концентрацию сажи на 81,0 %, а CO_2 — на 35,8 %. Концентрация же СО в ОГ при работе на газодизельном топливе, в том числе с РОГ при малых и средних нагрузках, повышается, а при повышении нагрузки выше номи-

нальной наблюдается ее снижение. На номинальном режиме на газодизельном топливе с $20\,\%$ РОГ снижение концентрации СО составило $14,3\,\%$.

При испытаниях дизеля 4Ч 11,0/12,5 мобильной ТЭУ на спиртовых эмульсиях использовали эмульсии следующего состава: 25 % спирта (метанол или этанол), 0,5 % моюще-диспергирующей присадки сукцинимид С-5A, 7 % воды, 67,5 % ДТ [11].

На рис. 5 представлены результаты исследований на дымность и концентрацию токсич-

ных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 мобильной ТЭУ от частоты вращения вала и нагрузки, работающего на МТЭ и ЭТЭ.

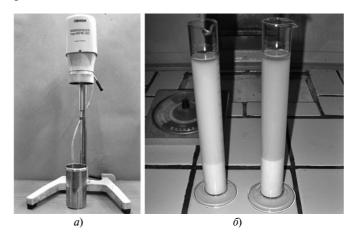


Рис. 2. Гомогенизатор MPW-302 (a) и приготовленные в нем спирто-топливные эмульсии (δ)

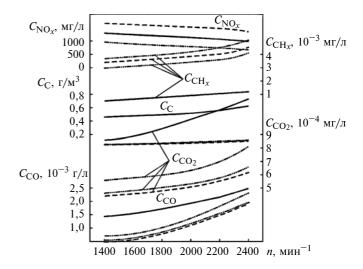


Рис. 3. Зависимости концентраций C токсичных компонентов (NO_x, CH_x, C, CO₂, CO) в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 мобильной ТЭУ от частоты n вращения вала при использовании ДТ (——), газодизельного топлива (——), газодизельного с 10 (···—·) и 20 % РОГ (—···—)

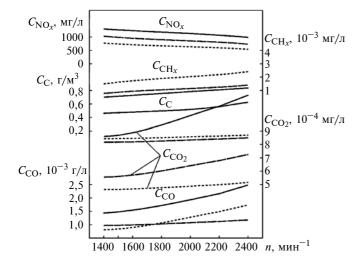


Рис. 4. Зависимости концентрации C токсичных компонентов (NO_x, CH_x, C, CO₂, CO) в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 мобильной ТЭУ от нагрузки F при использовании ДТ (_____), газодизельного топлива (---), газодизельного с 10 (\cdots —), 20 ($-\cdots$ —), 30 (\cdots —) и 40 % РОГ (\cdots —)

Сравнение концентрации токсичных компонентов в ОГ дизеля 4Ч 11,0/12,5 при работе на ДТ, МТЭ и ЭТЭ при разной частоте вращения вала показало, что использование МТЭ и ЭТЭ снижает концентрацию NO_x , CO, CO_2 и сажесодержание в ОГ во всем диапазоне частот вращения вала.

Так, при работе на МТЭ при $n=1400\div2400~\mathrm{Muh}^{-1}$ концентрация NO_x в ОГ снизилась соответственно на 21,5 и 25 %, CO — на 37,9 и 50 %, CO_2 — на 1,1 и 12,8 %, сажи — на 93,2 и 85,2 %. При работе на ЭТЭ при тех же частотах вращения вала снижение концентрации NO_x составило 40,8 и 46 %, CO — 44,8 и 29,2 %, CO_2 — 10,3 и 29,9 %, сажи — 79,6 и 77,1 %. Применение МТЭ и ЭТЭ увеличивает концентрацию CH_x в ОГ. Так, при работе на МТЭ при $n=2400~\mathrm{Muh}^{-1}$ концентрация CH_x увеличивается относительно ДП на 18,2 %.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 5, δ , показал, что применение МТЭ и ЭТЭ приводит к снижению концентрации в ОГ сажи, NO_x и CO_2 во всем диапазоне изменения нагрузки и СО на максимальных нагрузках, при этом увеличиваются выбросы CH_x . Так, на номинальном режиме работы применение МТЭ приводит к снижению концентрации сажи на 84,5 %, NO_x — на 29,6 %, CO — на 47,6 %, CO_2 — на 10,1 %, при этом выбросы CH_x увеличиваются на 9,1 %. Применение ЭТЭ на этом же режиме снижает концентрацию сажи на 79,3 %, NO_x — на 40,3 %, CO — на 28,6 %, CO_2 — на 26,6 %.

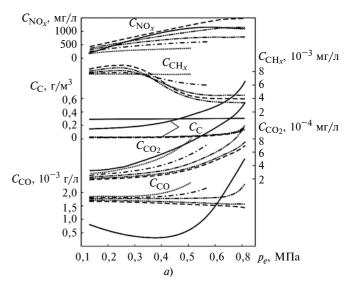
При исследованиях для работы на метаноле и МЭРМ дизель оборудовали двойной системой топливоподачи. При этом воспламенение метанола осуществляли подачей запальной порции МЭРМ. Данная схема топливоподачи полностью исключает необходимость использования нефтяного ДТ. Пуск и прогревание дизеля мобильной ТЭУ выпол-

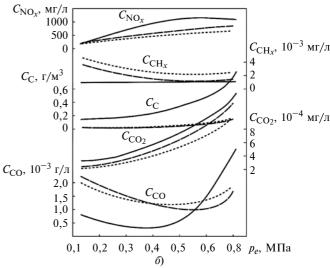
няли на МЭРМ, затем осуществляли подачу метанола, а подачу МЭРМ снижали до начала пропусков воспламенения. Затем для достижения устойчивой работы силовой установки подучу МЭРМ увеличивали. Таким образом, при использовании метанола и МЭРМ с двойной системой топливоподачи достигалось полное замещение нефтяного ДТ.

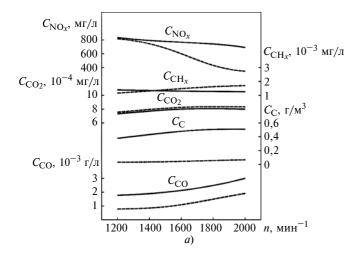
Для дизеля 2Ч 10,5/12,0 было разработано экологичное биотопливо, которое состояло из 88 % метанола и 12 % МЭРМ [12].

На рис. 6 представлены результаты исследований на дымность и концентрацию токсичных компонентов в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 мобильной ТЭУ, работающей на метаноле и МЭРМ, анализ которых показал следующее.

Применение данного биотоплива при $n=1200\div2000~{\rm Muh}^{-1}$ снижает концентрацию ${\rm NO}_x$ в ОГ до 48,5 %, сажи — 86,0÷92,1 %, СО — 36,7÷55,5 % и ${\rm CH}_x$ — 21,4 %. При этом повышается







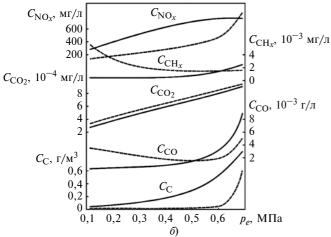


Рис. 6. Зависимости концентрации C токсичных компонентов (NO_x, CH_x, C, CO₂, CO) в ОГ дизеля 2Ч 10,5/12,0 мобильной ТЭУ от частоты n вращения вала (a) и нагрузки F (b) при применении ДТ (_____), метанола и МЭРМ (_----)

концентрация CO_2 на 4 % во всем исследуемом диапазоне частот вращения, а CH_x до 23,5 % на максимальной частоте вращения вала.

Анализ зависимостей, приведенных на рис. 6, δ , показал, что применение биотоплива, состоящего из метанола и МЭРМ, приводит к снижению концентрации в ОГ сажи и NO_x во всем диапазоне исследуемых нагрузок, а СО и CH_x на максимальных нагрузках, при этом увеличиваются выбросы CO_2 . Так, на номинальном режиме ($p_e = 0.588$ МПа) применение метанола и МЭРМ снижает в ОГ концентрацию сажи на 90,4 %, NO_x — на 47,4 %, CO — на 44,8 %, а концентрация CH_x практически соответствует применению ДТ, при этом увеличение концентрации CO_2 не превышает 5 %.

Таким образом, для улучшения экологических показателей мобильных ТЭУ предлагается использовать альтернативные энергоносители: газодизельное топливо (80 % ПГ, 20 % ДТ); спирто-топливную эмульсию (25 % метанола или этанола, 0,5 % моюще-диспергирующей присадки сукцинимид С-5A, 7 % воды, 67,5 % ДТ); биотопливо (88 % метанола, 12 % метилового эфира рапсового масла).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Aydin F., Ogut H.** Effects of Ethanol-Biodiesel-Diesel Fuel in Single Cylinder Diesel Engine to engine Performance and Emissions // Renewable Energy. 2017. Vol. 103. P. 688—694.
- 2. **Diesel-to-natural** gas engine conversion with lower compression ratio / G. G. Ter-Mkrtichyan, A. M. Saikin, K. E. Karpukhin, A. S. Terenchenko an. ot. // Pollution Research. 2017. Vol. 36. N. 3. P. 678—683.
- 3. **Biodiesel,** emulsified biodiesel and dimethyl ether as pilot fuels for natural gas fuelled engines / A. M. Namasivayam, T. Korakianitis, R. J. Crookes, K. D. H. Bob-Manuel // Applied Energy. 2010. Vol. 87. N. 3. P. 769—778.
- 4. **Aldhaidhawi M., Chiriac R., Badescu V.** Ignition delay, combustion and emission characteristics of Diesel engine fueled with rapeseed Biodiesel a literature review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 73. P 178—186
- 5. **Biodiesel** from rapeseed oil (brassica napus) by supported Li₂O and MgO / J. L. Solis, L. Alejo, A. L. Berkemar, Y. Kiros an. ot. // International Journal of Energy and Environmental Engineering. 2017. Vol. 8. N. 1. P. 9—23.
- 6. **Modeling** viscosity of butanol and ethanol blends with diesel and biodiesel fuels / M. Lapuerta, J. Rodríguez-Fernández, D. Fernández-Rodríguez, R. Patiño-Camino // Fuel. 2017. Vol. 199. P. 332—338.
- 7. **Васильев Ю. С.** Экология. Охрана окружающей среды: Сб. статей. СПб.: Политехн. университет, 2017. 220 с.
- 8. **Various** strategies for reducing NO_x emissions of biodiesel fuel used in conventional diesel engines: a review / J. Jeevahan, G. Mageshwaran, G. B. Joseph, R. B. D. Raj an. ot. // Chemical Engineering Communications. 2017. Vol. 204. N. 10. P. 1202—1223.
- 9. **Rajesh Kumar B., Saravanan S.** Use of Higher Alcohol Biofuels in Diesel Engines: a Review // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2016. Vol. 60. P. 84—115.
- 10. **Physical** and Chemical Properties of Ethanol-Diesel Fuel Blends / E. Torres-Jimenez, M. S. Jerman, A. Gregorc an. ot. // Fuel. 2011. Vol. 90. N. 2. P. 795—802.
- 11. **Likhanov V. A., Lopatin O. P.** Use of Natural Gas, Methanol and Ethanol Fuel Emulsions as Environmentally Friendly Energy Carriers for Mobile Heat Power Plants // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. N. 12. P. 935—944. Doi: 10.1134 / S0040601517120060.
- 12. **Лиханов В. А., Лопатин О. П.** Улучшение экологических показателей дизельных двигателей применением биотоплива // Двигателестроение. 2018. № 4 (274). С. 13—17.
- 13. **Лиханов В. А., Лопатин О. П.** Снижение токсичности отработавших газов автомобильного дизеля конвертацией на спирто-топливные эмульсии // Экология и промышленность России. 2018. Т. 22. № 10. С. 54—59. Doi: 10.18412/1816-0395-2018-10-54-59.
- 14. **Likhanov V. A., Lopatin O. P.** Investigation of the speed regime of tractor diesel engine running on natural gas with recirculation // VII Int. Conf. "Modern Technologies for Non-Destructive Testing". IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 457. N. 012011. Doi: 10.1088/1757-899X/457/I/012011.
- 15. **Romanyuk V., Likhanov V. A., Lopatin O. P.** Reducing the environmental threat of motor vehicles by converting engines for operating on natural gas // Теоретическая и прикладная экология. 2018. № 3. С. 27—32. Doi: 10.25750/1995-4301-2018-3-027-032.

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

УДК 658.5

В. А. ДОЛГОВ, д-р техн. наук (МГТУ "СТАНКИН"), А. А. КАБАНОВ, канд. техн. наук (МАИ — национальный исследовательский университет), А. А. ЛЕОНОВ, С. В. ЛУЦЮК, канд. техн. наук (МГТУ "СТАНКИН"), e-mail: v-dolgov@yandex.ru

Имитационное моделирование процессов технического обслуживания и ремонта оборудования

Представлен сравнительный анализ двух подходов к составлению графика планово-предупредительных ремонтов (ППР) технологического оборудования. Исследовано их влияние на производственный цикл. Предложен метод моделирования периодичности ППР при разработке имитационных моделей производственных процессов на основании наработки оборудования.

Ключевые слова: техническое обслуживание, ремонт, технологическое оборудование, имитационное моделирование.

A comparative analysis of two approaches to scheduling of planned preventive maintenance (PPM) of technological equipment is presented. Their influence on the production cycle is studied. A method is proposed for simulating the periodicity of PPM in the development of simulation models of manufacturing processes based on equipment operating time.

Keywords: maintenance, repair, technological equipment, simulation modeling.

При проектировании машиностроительных предприятий и выполнении различных инжиниринговых проектов все чаще используют имитационное моделирование производственных процессов [1-4]. Эффективность данной технологии во многом зависит от степени детализации разрабатываемого объекта [5-8]. В машиностроении таким объектом является производственно-технологическая система (ПТС) [8, 9], в которой выполняются логистические операции по управлению и преобразованию материальными потоками (МП). Поэтому модель ПТС включает в себе блоки преобразования, управления и поддержки МП [8, 10, 11]. Элементы модели ПТС делятся на физические, преобразующие МП и логические, управляющие $M\Pi$ [12—15].

Логические связи, определяющие доступность оборудования, формируют исходя из действующей на предприятии системы технического обслуживания и ремонта.

На отечественных машиностроительных предприятиях используют единую систему плановопредупредительных ремонтов (ППР), которая обеспечивает выполнение следующих видов обслуживания: технический осмотр (ТО), текущий (малый) ремонт (ТР), средний ремонт (СР), капитальный ремонт (КР).

На выполнение разных видов обслуживания и ремонта требуется разное время, и выполняются они с определенной периодичностью, которые определяют доступность оборудования.

Графики ППР, как правило, разрабатываются совместно службами главного механика, главного энергетика и начальниками цехов на основании выделенных объемов ремонтных работ, информации о текущем состоянии оборудования и плановой загрузке оборудования.

В некоторых случаях графики ремонтов формируют на основании наработок оборудования. Их разрабатывают на меньший период в соответствии с фактической или моделируемой наработкой оборудования.

В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа двух подходов к разработке графиков ППР.

Tаблица 1 Сравнение двух подходов к разработке графиков ППР

Аспект сравнения	На основании плановой периодичности	На основании наработки оборудования
Основание начала выполнения	График ППР	Наработка оборудования
Задание интервалов между ремонтами	В календарных днях (месяцах)	В станко-часах
Связь начала ремонта с наработкой	Отсутствует (наработка нормативная)	Постоянная (наработка фактическая)
Корректировка графика	В соответствии с фактической наработкой не осуществляется	Осуществляет- ся постоянно

При моделировании технического обслуживания и ремонта (ТОиР) оборудования учитывают временные и логические связи [10—12].

Временные связи определяют продолжительности операций и моменты их начала. Продолжительность ТОиР задается календарным интервалом.

Особенности временных связей:

для каждой операций ТОиР задают продолжительность конкретным моментом времени или диапазоном, последнее применяют для операций, которые сложно формализовать;

продолжительность восстановления оборудования после отказа может задаваться случайной величиной.

Логические связи определяют алгоритм периодичности событий: ремонт, обслуживание и отказ оборудования.

Периодичность ТОиР задают временным интервалом или наработкой между данным видом ТОиР и таким же последующим или другим видом большей сложности (ГОСТ 18322—78).

Логические связи операций ОТиР при разных подходах κ формированию ППР приведены в табл. 2.

Рассмотрим логические связи при формировании графиков ППР на основании наработки оборудования. В этом случае процессы ТОиР должны

Таблица 2 Анализ логических связей, определяющих доступность оборудования, при имитационном моделировании производственных процессов

Аспект сравнения	График ППР на основании плановой периодичности ТОиР	Графики ППР на основании наработки
Вид связи	Жесткий	Гибкий
Начало работ	Конкретная дата или задается стохастически (может явно не задаваться, указывается только месяц)	По нормативной наработке оборудования или моделируемой для каждого видаремонта и технического обслуживания
Приоритет- ность ТОиР или техноло- гической операции	Если запланированное ТОиР наступает раньше, чем закончится технологический цикл обработки партии заготовок, то ТОиР выполняется раньше	Если цикл обработки партии заготовок больше оставшейся наработки до ближайшего ТОиР, то ТОиР выполняют раньше
Моделирова- ние момен- та отказа	Задается случайной величиной на основании статистики отказов	Задается случайной величиной, на основании статистики отказов по наработке оборудования
Последова- тельность выполнения операций ре- монта	Задается графиком ППР	Задается по приоритетности с учетом поглощения ремонтных циклов более низкого уровня

учитывать: виды ТОиР, их периодичность в соответствии с наработками, их продолжительности, наработку оборудования.

При разработке имитационной модели используют следующие понятия:

цикл технического обслуживания — наименьшая повторяющаяся наработка оборудования, в течение которой выполняются в определенной последовательности в соответствии с требованиями нормативно-технической или эксплуатационной документации все установленные виды периодического технического обслуживания;

периодичность технического обслуживания (ремонта) — наработка оборудования между данным видом технического обслуживания (ремонта) и последующим таким же видом или другим большей сложности.

Графики ППР для каждой единицы оборудования учитывают циклы технического осмотра и различных ремонтов.

При разработке имитационных моделей учитывают следующие циклы: цикл технического обслуживания (Π_{TO}), цикл текущего ремонта (Π_{TP}), цикл среднего ремонта (Π_{CP}), цикл капитального ремонта (Π_{CP}).

Цикл технического обслуживания включает в себя периодичность технического осмотра (Π_{TOc}) и продолжительность одного технического осмотра (Πp_{TOc}):

$$\coprod_{TO} = \prod_{TOc} + \prod_{p_{TOc}}$$

Цикл текущего ремонта включает в себя сумму циклов технических обслуживаний, периодичность одного технического обслуживания (Π_{TO}) и продолжительность одного текущего ремонта (Π_{DTP}):

$$\coprod_{TP} = \sum \coprod_{TOi} + \prod_{TO} + \prod_{PTP}.$$

Цикл среднего ремонта включает в себя сумму циклов текущих ремонтов, периодичность одного текущего ремонта (Π_{TP}) и продолжительность одного среднего ремонта (Π_{DCP}):

$$\coprod_{CP} = \sum \coprod_{TPi} + \prod_{TP} + \prod_{PCP}.$$

Цикл капитального ремонта включает в себя сумму циклов средних ремонтов, периодичность одного среднего ремонта и продолжительность одного капитального ремонта (Πp_{KP}):

$$\coprod_{KP} = \sum \coprod_{CPi} + \prod_{CP} + \prod_{pKP}.$$

Особенности предлагаемого моделирования ТОиР:

текущий ремонт включает в себя циклы технических осмотров;

средний ремонт включает в себя циклы текущих ремонтов;

капитальный ремонт включает в себя циклы средних ремонтов;

виды ремонта отличаются приоритетностью: наивысший приоритет имеет капитальный ремонт, затем — средний, далее — текущий ремонт;

циклы ремонтов задают кратными интервалами, что исключает смещение начала ремонтов во времени. Например, может возникнуть такая ситуация, что совпадут начала капитального, среднего и текущего ремонтов. Предложенный подход и кратность интервалов обеспечат выполнение только капитального ремонта;

циклы задают только постоянной величиной; вероятность отказа оборудования моделируют в

интервале: между окончанием выполнения технологической операции и началом выполнения следующей операции.

Задание вероятности наступления события в цикле позволяет учитывать наработку оборудования [9, 10].

Предложенный принцип моделирования ТОиР использовали при расчете производственных циклов изготовления корпуса плунжерного насоса.

Исходные данные и принятые условия:

производственная программа 1100 шт./год;

время перемещения заготовок между рабочими местами 0,01 ч;

фактор отказа оборудования исключен;

режим работы участка — трехсменный, без выходных;

базовый цикл технического обслуживания $\coprod_{TO} = 216 \ \text{ч}.$

Виды ремонтов по месяцам и их среднее время выполнения приведены в табл. 3.

Расчет простоя технологического оборудования, обусловленного выполнением ТОиР, показал, что при выполнении всех технологических операций за 1205,72 ч простой всей технологической системы составит 25 ч, а каждая единица оборудования будет простаивать 60 ч.

При разных подходах к разработке ПИР производственные циклы составили соответственно 1230,72 и 1265,72 ч.

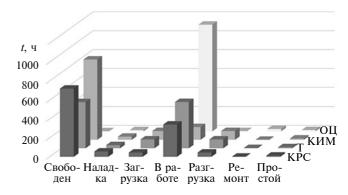


Диаграмма состояний разных единиц технологического оборудования

Производственный цикл изготовления 1100 деталей, полученный имитационным моделированием, составил 1214,61 ч.

Пример сводной диаграммы состояний для каждой единицы оборудования представлен на рисунке.

Анализ полученных результатов показал, что для небольшой производственной системы, включающей в себя до 10 единиц технологического оборудования, подход к определению периодичности ТОиР несущественен, разница составила 5 %.

Исследования показали, что влияние подхода на производительность производственной системы усиливается при повышении неритмичности производства и числа технологического оборудования. Большие отклонения производственных циклов наблюдались при вводе в имитационную модель внеплановых технических простоев, вызванных отказами оборудования, они составили более 30 %.

При изготовлении сложных изделий формирование ППР на основании плановой периодичности ТОиР становится неприемлемым, так как является дополнительным источником разбалансированности производственной системы и не позволяет в полной мере использовать ресурс технологического оборудования. Разработку ППР предпочтительнее осуществлять моделированием ТОиР с учетом наработок для каждой единицы оборудования.

Виды ремонтов по месяцам (среднее время их выполнения, ч)

Таблица 3

Оборудование	Месяц											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Координатно-расточной станок (КРС)	O	O	O	O	T	O	O	O	O	T	O	O
	(0,8)	(0,8)	(0,8)	(0,8)	(12)	(0,8)	(0,8)	(0,8)	(0,8)	(12)	(0,8)	(0,8)
Токарный станок с ЧПУ (Т)	O	O	O	O	T	O	O	O	O	T	O	O
	(1,5)	(1,5)	(1,5)	(1,5)	(8)	(1,5)	(1,5)	(1,5)	(1,5)	(8)	(1,5)	(1,5)
Контрольно-измерительная машина (КИМ)	O	O	O	O	T	O	O	O	O	T	O	O
	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(3)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(3)	(0,5)	(0,5)
Пятикоординатный фрезерный обрабатывающий центр (ОЦ)	O (2)	O (2)	O (2)	O (2)	T (2)	O (2)	O (2)	O (2)	O (2)	T (2)	O (2)	O (2)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- 1. **Толуев Ю. И.** Задачи имитационного моделирования при реализации концепции индустрия 4.0 в сфере производства и логистики // Тр. 8-й науч.-практ. конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика". 2017. СПб.: ВВМ, С. 57—65.
- 2. **Григорьев С. Н., Кутин А. А., Долгов В. А.** Принципы построения цифровых производств в машиностроении // Вестник МГТУ "Станкин". № 4 (31). 2014. С. 10—15.
- 3. **Yan Lu, Morris K. C., Frechette S.** Current Standards Landscape for Smart Manufacturing Systems NISTIR. 2016. http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8107.
- 4. **Dolgov V. A.** Simulation of technological systems in custom production // Russian Engineering Research. 2010. Vol. 30. Is. 9. P. 951—955.
- 5. **Simulation** modeling of assembly processes in digital manufacturing / A. Kutin, V. Dolgov, A. Podkidyshev, A. Kabanov an. ot. // Conf. Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. 2017. Vol. 67. P. 470—475.
- 6. **Hirakawa Y.** Performance of a multistage hybrid push/pull production control system // International Journal of Production Research. 1996. Vol. 44. P. 129—135.
- 7. **Формирование** информационной модели для оценки эффективности производственной системы / В. А. Долгов, А. А. Кабанов, Н. С. Андреев, И. В. Дацюк // Вестник МГТУ "Станкин". 2014. № 4 (31). С. 191-195.
- 8. **Долгов В. А., Кабанов А. А.** Основные подходы к формированию информационной модели производственно-технологической системы машиностроительного предприятия // Автоматизация. Современные технологии. 2018. № 4. С. 178—184.
- 9. Семантические модели технологических систем для имитационного моделирования производственных

- процессов / В. А. Долгов, А. А. Подкидышев, И. В. Дацюк и др. // Автоматизация. Современные технологии. 2018. \mathbb{N} 8. С. 350—354.
- 10. **Повышение** эффективности разработки имитационных моделей при проектировании новых многономенклатурных машиностроительных цехов / В. А. Долгов, А. А. Кабанов, Н. С. Андреев, И. В. Дацюк // Конф. "Имитационное моделирование. Теория и практика. 2015. Ин-т проблем упр. им. В. А. Трапезникова РАН. Т. 1. С. 73—79.
- 11. **Competitive-resource** information model of the machin building manufacturing system / A. A. Kutin, V. A. Dolgov, A. A. Kabanov an. ot. // Conf. Materials and Engineering. 2018. Vol. 448 (1).
- 12. Долгов В. А., Луцюк С. В., Васильцов М. А. Особенности формирования маршрутных технологических процессов на основе согласования технологических и производственных решений многономенклатурного производства // Вестник МГТУ "Станкин". 2018. № 1 (44). С. 13—17.
- 13. Долгов В. А. Повышение эффективности многономенклатурного машиностроительного производства путем адаптации работ технологического процесса к текущему состоянию технологической системы // Вестник МГТУ "Станкин". 2011. № 3. С. 83-87.
- 14. **Разработка** дорожной карты развития цифрового производства в РФ / А. А. Кутин, В. Н. Андреев, С. С. Ивашин, В. А. Долгов. М.: Минобрнауки России, МГТУ "СТАНКИН", 2017. 192 с.
- 15. Вороненко В. П., Долгов В. А. Информационная модель базового производственно-технологического решения для адаптации технологического процесса к текущему состоянию системы предприятия // Вестник МГТУ "Станкин", 2011. № 3 (15). С. 173—177.

Вниманию авторов

Не допускается предлагать к публикации уже опубликованные или намеченные к публикации в других журналах материалы.

Статьи в редакцию можно присылать на e-mail: vestmash@mashin.ru. В случае пересылки статьи почтой, кроме текста, напечатанного на белой бумаге формата A4 на одной стороне листа через 1,5—2 интервала 14-м кеглем, необходимо прикладывать электронную версию (шрифт Times New Roman в Microsoft Word, 14-й кегль, расстояние между строк 1,5).

К статье прилагаются:

- 1) акт экспертной комиссии, подтверждающий, что статья не содержит материалов, входящих в перечень сведений, отнесенных к государственной тайне Указом Президента РФ № 1203 от 30.11.1995, и может быть опубликована в открытой печати;
 - 2) аннотация (1—3 предложения) и ключевые слова;
- 3) сведения об авторах (фамилия, имя, отчество, место работы, должность, ученая степень, адрес, e-mail, телефон).

Объем статьи не должен превышать 20 страниц (с рисунками и таблицами). Все страницы должны быть пронумерованы. Рисунки и таблицы давать после текста.

Представляя статью в редакцию для публикации, авторы выражают согласие с тем, что:

- 1) статья может быть переведена и опубликована на английском языке;
- 2) после публикации в журнале материал может быть размещен в Интернете;
- 3) авторский гонорар за публикацию статьи не выплачивается.

Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Представленные в редакцию материалы обратно не высылаются.

Минимальный срок публикации — 4 месяца со дня предоставления рукописи в редакцию при соблюдении всех изложенных выше требований (обусловлен технологическим процессом).