ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

11

2013

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 Машиностроение»
107076, Москва, Стромынский пер., 4

Адрес редакции:
107076, Москва,
Стромынский пер., 4.
Телефон: 8-(499)-748-02-91.
E-mail: vestmash@mashin.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за № 77-12421 в Комитете Российской Федерации по печати
Учредитель: А.И. Савкин

Индексы: **70120** ("Роспечать"),
27841 ("Пресса России"),
60264 ("Почта России")
Цена свободная

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

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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), **Дроздов Ю.Н.,** д-р техн. наук, акад. РИА и РАК (председатель секции конструирования и расчета машин), **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, **Салтыков М.А.,** д-р техн. наук, **Трегубов Г.П.,** д-р техн. наук, **Скугаревская Н.В.** (ответственный секретарь)

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Тверсков Б. М. — Гашение крутильных колебаний трансмиссии 3

Саяпин С. Н. — Универсальный быстро собираемый параболический рефлектор с регулируемой поверхностью для работы в СВЧ диапазоне 6

Корнеев А. Ю. — Устойчивость жесткого ротора в конических подшипниках скольжения . . . 14

Александров И. К. — Определение величины проскальзывания тела качения в шариковом подшипнике 19

Иванов А. А. — Промышленные роботы в транспортно-накопительной системе 21

Янко В. М. — Поверхностная обработка резьбы на титановых трубах для повышения надежности и долговечности соединений 23

Большаков О. А., Рыбаков А. В. — Автоматное моделирование подсистемы управления комплектной трансформаторной подстанцией собственных нужд и распределительным устройством 25

Цикл статей "Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки"

Дроздов Ю. Н., Безносов А. В., Бокова Т. А., Шумилков А. И., Махов К. А., Черныш А. С. — Трение в среде высокотемпературного свинцового теплоносителя . . . 29

Седакова Е. Б., Козырев Ю. П. — Прогнозирование триботехнических свойств полимерных композитов на основе физической модели изнашивания 34

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Индаков Н. С., Бинчуров А. С. — Особенности геометрии многогранных резцов для ротационного точения 38

Расторгуев Г. А. — Оптимальная последовательность операций механической обработки с учетом технологической наследственности 41

Юркевич В. В. — Диагностика металлообрабатывающих станков 44

Крохалев А. В., Авдеюк О. А., Приходьков К. В., Савкин А. Н., Кузьмин С. В., Лысак В. И. — Технология взрывного плакирования заготовок твердыми сплавами . . . 45

Пини В. Е. — Сопротивление подшипников качения и скольжения вращению 49

Агеев Е. В., Агеева Е. В. — Разработка оборудования и технологии получения порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов для промышленного использования 51

Цикл статей "Проблемы теории механической обработки"

Воронцов А. Л. — Теоретическое обеспечение технологической механики. 7. Осесимметричная задача теории пластичности. Часть 3 57

Обработка материалов без снятия стружки

Манзулин С. М., Санкин Ю. Н. — Учет сложности конфигурации детали при холодной штамповке 66

ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА

Васильев В. Н. — Технологическая зависимость экономики, переход машиностроительных предприятий на инновационный путь развития и особенности выхода России из текущей депрессии 72

Вопросы образования и кадровая политика в машиностроении

Ивашов Е. Н., Васин В. А., Степанчиков С. В. — Роль изобретательства в техническом прогрессе и профессиональном образовании 81

ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Колесников К. С., Дубровский В. А. — Достижения РАН в области машиностроения за 2012 год 84

Декер И. — Модернизация традиционной токарной обработки с применением современных технологий 87

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Tverskov B. M. — Damping of torsional vibrations of a transmission

Sayapin S. N. — Universal quickly assembled parabolic reflector with regulate surface for operating in microwave band

Korneev A. Yu. — Stability of rigid rotor in tapered sliding bearings

Aleksandrov I. K. — Definition of slipping value of a rolling element in a ball bearing

Ivanov A. A. — Industrial robots in a storage retrieval system

Yanko V. M. — Surface treatment of threads on titanium tubes for increasing of reliability and durability of the joints

Bol'shkov O. A., Rybakov A. V. — Automatic modeling of subsystem of control of complete transformer substation for own needs and distribution device

A series of articles "Problems of tribology — friction, wearing away and lubrication"

Drozdov Yu. N., Beznosov A. V., Bokova T. A., Shumilkov A. I., Makhov K. A., Chernysh A. S. — Friction in high-temperature lead heat-transfer fluid medium

Sedakova E. B., Kozyrev Yu. P. — Prediction of tribotechnical properties of polymer composites basing on physical wear model

MANUFACTURING ENGINEERING

Indakov N. S., Binchurov A. S. — Geometrical features of multisurface cutters for rotary cutting

Rastorguev G. A. — Optimal sequence of machining operations regarding manufacturing heredity

Yurkevich V. V. — Diagnostics of metalworking machine tools

Krokhalev A. V., Avdeyuk O. A., Prikhod'kov K. V., Savkin A. N., Kuz'min S. V., Lysak V. I. — Technology of explosive cladding of workpieces by hard alloys

Pini V. E. — Rotational resistance of roller and sliding bearings

Ageev E. V., Ageeva E. V. — Development of equipment and technology for obtaining of powders from waste of tungsten-containing hard alloys for industrial application

A series of articles "Problems of theory of machining work"

Vorontsov A. L. — Theoretical support of technological mechanics. 7. Axisymmetrical problem in the theory of plasticity. Part 3

Chipless processing of materials

Manzulin S. M., Sankin Yu. N. — Part configuration complexity accounting in cold forming process

ORGANIZATION AND ECONOMICS OF PRODUCTION

Vasil'ev V. N. — Technological addiction of economics, machine-building plants conversion to innovative way of development and features of way out of Russia from current depression

Questions of education and personnel policy in mechanical engineering

Ivashov E. N., Vasin V. A., Stepanchikov S. V. — Role of invention in technical progress and professional education

TECHNICAL INFORMATION

Kolesnikov K. S., Dubrovskiy V. A. — Achievements of RAS in field of mechanical engineering over 2012

Deker I. — Modernization of traditional turning with modern technologies application

Технический редактор *Т. А. Шацкая*
Корректор *Т. В. Пчелкина*

Сдано в набор 02.09.2013. Подписано в печать 14.10.2013.
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.

© ООО "Издательство Машиностроение", "Вестник машиностроения", 2013

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК 629.11.01:62-23:534.1

Б. М. ТВЕРСКОВ, канд. техн. наук (Курганский ГУ), e-mail: sinicin@kgsu.ru

Гашение крутильных колебаний трансмиссии

Предложен способ гашения крутильных колебаний трансмиссии автомобилей, состоящий в снижении жесткости демпфера до значения, при котором колебания невозможны.

Ключевые слова: жесткость демпфера, амплитуда, момент трения.

The way of torsional vibrations damping of the automobile transmission, basing on damper stiffness decrease to the value when the vibrations are not possible, is suggested.

Keywords: damper stiffness, amplitude, frictional moment.

Неравномерность вращения деталей трансмиссии автомобилей и других машин, на которых установлен поршневой двигатель, вызвана в основном неравномерностью вращения коленчатого вала, периодически нагружаемого при сгорании топлива в цилиндрах. Следствием неравномерности, называемой также крутильными колебаниями, могут быть поломки деталей двигателя и трансмиссии при резонансах и повышенное изнашивание зубьев зубчатых колес трансмиссионных агрегатов практически при всех частотах вращения коленчатого вала.

Широко используемый способ борьбы с крутильными колебаниями — снижение их амплитуды при резонансе. Для этого в демпфере, соединяющем двигатель и трансмиссию, создают момент трения. Чтобы определить его значение, выполняют сложнейший расчет на крутильные колебания. Работа трудоемкая, а результаты скромные: достаточно изменить характеристику двигателя и нужно выполнять новый расчет. Допустима погрешность данного расчета в 20 %. При этом крутильные колебания трансмиссии между резонансами при использовании данного способа остаются.

Установлено, что во всем диапазоне частот вращения коленчатого вала в трансмиссии наблюдаются один—два значительных резонанса. Крутильные колебания между резонансами, приводящие к изнашиванию зубьев зубчатых колес, как правило, не рассматриваются. Однако изнашивание зубчатых колес редукторов трансмиссии происходит в основном при межрезонансных частотах вращения, на которых в основном и работает двигатель. Зубья зубчатых колес изнашиваются даже при небольших амплитудах резонансных колебаний.

Прежде всего это относится к машинам с дизелями, которые менее уравновешены, так как на них устанавливают облегченные маховики, частота вращения коленчатого вала дизеля небольшая, а жесткость демпфера высокая. Все это приводит к большим амплитудам колебаний вращающего момента, поступающего на трансмиссию, т. е. имеют место более значительные разрушительные воздействия, чем на автомобилях с бензиновыми двигателями, у которых частота вращения коленчатого вала намного выше и поэтому данный недостаток проявляется меньше.

На заводах, изготовляющих тяжелую транспортную технику с мощными дизелями, как правило, возникают проблемы с крутильными колебаниями трансмиссии, которые указанным выше способом устраняются лишь частично. Пока еще не разработан эффективный способ борьбы с крутильными колебаниями трансмиссии, вызванными неравномерным вращением маховика двигателя. Не спасают и разработанные дифференциальные уравнения, так как при изменении жесткости вала, массы детали или отключении нескольких цилиндров все расчеты надо выполнять заново. Используемый способ требует значительных средств и при этом дает весьма скромные результаты. К тому же далеко не на каждом предприятии его можно использовать: чтобы определить амплитуды колебаний сосредоточенных масс надо предварительно найти моменты инерции всех деталей трансмиссии вплоть до колес и жесткость валов, соединяющих сосредоточенные массы, сделать их приведение, выполнить гармонический анализ зависимости изменения вращающего момента двигателя, составить дифференциальные уравнения, описывающие колебания сосредоточенных масс, и определитель для решения этих уравнений и т. д.

Поэтому предлагается иной способ борьбы с крутильными колебаниями трансмиссии — не допускать их появления.

Амплитуда колебания, передаваемого от демпфера на трансмиссию вращающего момента, равна

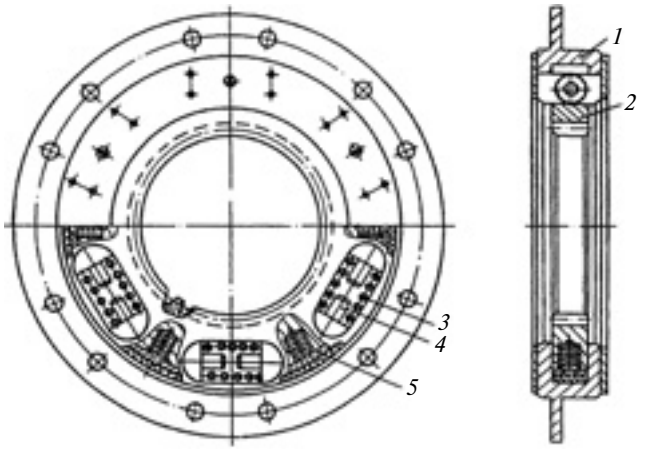


Рис. 1. Упругофрикционный демпфер:
1 и *2* — наружная и внутренняя обоймы; *3* — пружина; *4* — сухарь; *5* — фрикцион

произведению амплитуды угла колебаний вращающегося маховика двигателя на жесткость упругого элемента демпфера, соединяющего двигатель и трансмиссию. При уменьшении жесткости упругого элемента снижается амплитуда колебания, передаваемого на трансмиссию вращающего момента. Эта зависимость — линейная. Известно, что при снижении жесткости демпфера амплитуда колебаний трансмиссии уменьшается.

При небольших углах закрутки демпфера, а следовательно, высокой его жесткости устранить крутильные колебания трансмиссии невозможно. Амплитуды колебаний подведенного к трансмиссии вращающего момента остаются слишком большими и трансмиссия испытывает значительные крутильные колебания.

Уменьшением жесткости демпфера можно добиться, того что амплитуда колебания подводимого к трансмиссии вращающего момента станет меньше момента трения в трансмиссии, т. е. амплитуды будет недостаточно для преодоления сил трения и крутильные колебания в трансмиссии не возникнут.

Таким образом, суть предлагаемого способа заключается в следующем: уменьшить амплитуду колебаний подводимого момента до значения, при котором энергии колебаний не будет хватать для возникновения резонанса. Кроме того, частота собственных колебаний будет резко снижена согласно известному выражению $\omega = \sqrt{c/M}$, где ω — частота собственных колебаний; c — жесткость; M — масса, на которую действует упругая система. Это означает, что возникновение резонанса сдвинется в область нерабочих частот вращения коленчатого вала. Во многих случаях это может стать решением проблемы.

Жесткость демпфера определяется углом закрутки его ведомых частей относительно ведущих частей под действием максимального вращающего момента со стороны двигателя. В современных демпферах угол закрутки, как правило, составляет 2÷5° (редко больше), после чего витки тангенциально расположенных в демпфере пружин упираются один в другой и демпфер выключается. Угол закрутки демпфера (рис. 1) тягача МАЗ-537 (Курганский завод колесных тягачей) составляет 1,7°.

Неравномерность вращения коленчатого вала для двигателей каждого типа индивидуальна. При работе на максимальной мощности для различных двигателей амплитуда колебаний составляет от нескольких минут до 1°. На резонансных режимах этот угол может быть больше. Угловые колебания вращающегося коленчатого вала зависят от конструкции двигателя. На каждом режиме работы они достаточно постоянны. Уменьшить их при эксплуатации двигателя невозможно.

При известном способе борьбы с крутильными колебаниями амплитуду колебаний вращающего момента после демпфера ограничить не удается.

Детали дотрансформаторной зоны трансмиссии рассматриваемых тягачей при колебаниях испытывают большое число циклов нагружения. Установленный за двигателем согласующий редуктор (повышающая передача) (рис. 2) — один из самых изнашиваемых агрегатов трансмиссии, поэтому для повышения эффективности эксплуатации тягача потребовалось увеличить его ресурс. Главный дефект согласующих редукторов — питинг зубьев зубчатых колес. Увеличение ширины зубьев мало улучшило ситуацию.

Значение силы, действующей в контактах зубьев при колебаниях, зависит от инерционности системы. Значительные колебания подводимого к трансмиссии вращающего момента обусловливают большие силы инерции, что приводит к усталостному изнашиванию поверхности зуба.

Вращающий момент от маховика *9* двигателя передается через упругофрикционный демпфер *1* на входной вал повышающей передачи и через три ее зубчатых колеса — на карданный вал к насосному колесу гидротрансформатора. Три зубчатых колеса повышающей передачи образуют два зубчатых зацепления, в каждом из которых потери на трение передаваемого момента составляют 1÷2 %. Чтобы крутильные колебания не возникали, амплитуда колебаний подводимого к повышающей передаче вращающего момента не должна превышать указанную величину. Кроме того, в согласующем редукторе имеются: привод *2* вентиляторов системы охлаждения двигателя, привод *3* компрессоров, привод *8* насоса рулевого управления. Общие потери передаваемого вращающего момента в согласующем редукторе составляют 5÷8 %, т. е. от максимального вращающего момента двигателя (2500 Н · м) они составляют 150÷200 Н · м.

Испытаниями установлено, что амплитуда колебаний вращающего момента после демпфера, т. е. при отсутствии резонанса, составляет 500÷600 Н · м, а при резонансе она близка к максимальному моменту двигателя, т. е. приблизительно в 5 раз больше. Не лучше ситуация для торсионного демпфера (рис. 3) с регулируемым моментом трения, которым

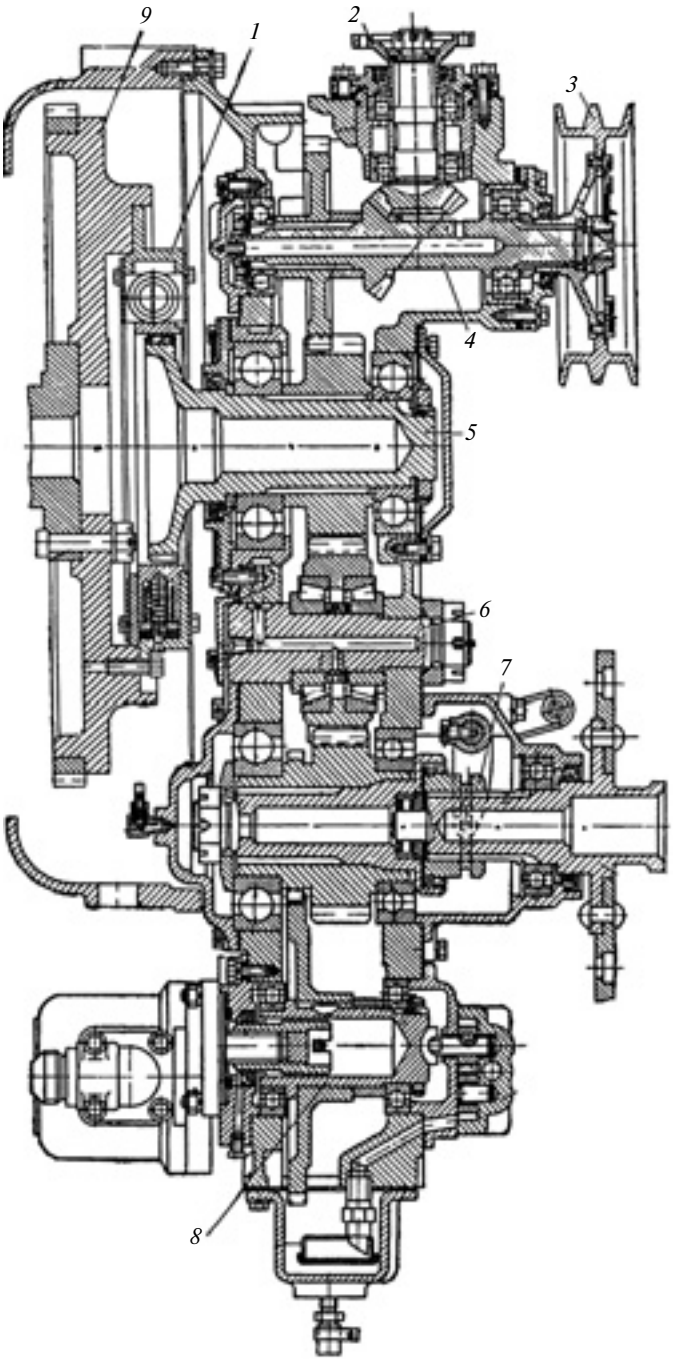


Рис. 2. Согласующий редуктор:
1 — упругофрикционный демпфер; *2* — привод вентиляторов системы охлаждения; *3* — привод компрессоров; *4* — вал привода компрессоров; *5* и *6* — входной и промежуточный валы согласующего редуктора; *7* — муфта для отключения трансмиссии при пуске холодного двигателя; *8* — привод насоса рулевого управления; *9* — маховик двигателя

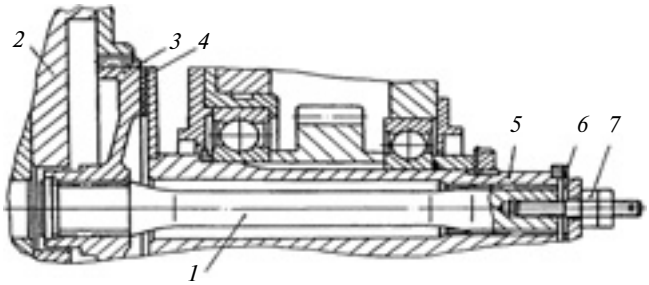


Рис. 3. Торсионный демпфер:
1 — торсион; *2* — маховик двигателя; *3* — муфта; *4* — фрикционный диск; *5* — трубчатый входной вал; *6* — тарельчатая пружина; *7* — гайка регулировки момента трения фрикциона

был заменен показанный на рис. 2 демпфер с тангенциально расположенными пружинами.

Используемый для гашения крутильных колебаний демпфер содержит упругий элемент и элемент трения, который обязателен при традиционном способе борьбы с крутильными колебаниями. В предлагаемом способе он не только не нужен, но и вреден, так как через него на трансмиссию будут передаваться колебания вращающего момента. Момент трения в демпфере составляет обычно как правило 20 % от момента вала двигателя. В данном случае это много.

Чтобы амплитуда колебания подводимого к трансмиссии вращающего момента стала меньше момента трения в трансмиссии, при котором крутильные колебания трансмиссии невозможны, жесткость упругого элемента демпфера необходимо снизить относительно существующего в 30÷50 раз, т. е. вместо угла 2÷5° (с учетом различного рода неточностей) для гарантированного результата угол закрутки должен составлять 90÷150°. Теоретически достаточно и 40°. Амплитуда колебаний подводимого к трансмиссии вращающего момента, как правило, не должна превышать 1÷2 % передаваемого момента. Для этого нужен демпфер иной конструкции. В таком демпфере в качестве упругого элемента можно использовать центральную винтовую или спиральную пружину, обеспечивающую закрутку как в одну, так и в другую сторону.

На рис. 4 показан демпфер со спиральной пружиной, который можно установить сразу за маховиком двигателя. Раскрутка спиральной пружины прекращается, если ее внешний виток касается стенки корпуса.

Предлагаемый способ гашения крутильных колебаний весьма эффективен. При этом значительно снижаются требования к уравновешенности двигателя, вплоть до возможности использования двигателя без маховика, иногда устанавливаемого на спецтехнике. Испытания тягача КЗКТ-545 с двигателем А-38 без маховика приводили к разрушению трансмиссии. Во ВНИИ-100 для устранения разрушительных действий крутильных колеба-

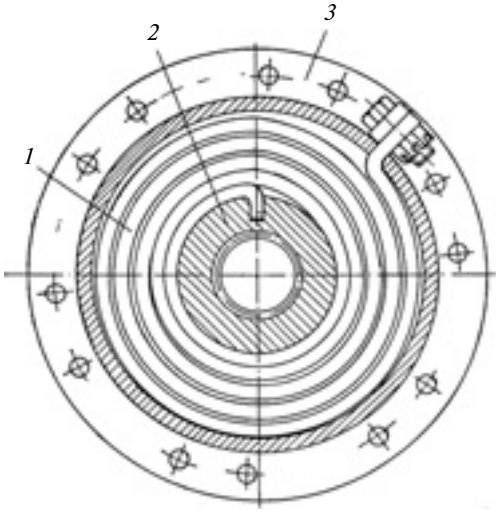


Рис. 4. Демпфер со спиральной пружиной:
1 — спиральная пружина; *2* — входной вал согласующего редуктора; *3* — фланец для крепления спиральной пружины к маховику двигателя

ний предложили объемный список математических выкладок.

Новый способ позволяет без значительных отрицательных последствий выключать несколько цилиндров дизеля или блока цилиндров V-образного двигателя, что без использования этого способа вызывает большую неравномерность вращения маховика, резонансы и разрушение трансмиссии.

Таким образом, предлагаемый способ борьбы с крутильными колебаниями трансмиссии — снижение амплитуды колебания подводимого к трансмиссии вращающего момента до значения, близкого к моменту трения в первом агрегате трансмиссии, позволяет:

исключить резонансные колебания трансмиссии;

исключить повышенное изнашивание трансмиссии;

исключить сложный расчет крутильных колебаний трансмиссии с целью определения амплитуды колебаний при резонансе;

исключить выполнение гармонического анализа зависимости вращающего момента вала двигателя для получения правой части дифференциальных уравнений;

снизить требования к уравновешенности двигателя вплоть до использования двигателя без маховика;

отключать один из блоков V-образного двигателя, не опасаясь разрушить трансмиссию из-за неравномерности вращения коленчатого вала и резонанса колебаний;

исключить элемент трения в демпфере;

вести на заводах-изготовителях исследования по снижению крутильных колебаний коленчатого вала;

использовать один упругий соединительный элемент (демпфер) для разных двигателей, незначительно отличающихся мощностью.

На предлагаемый способ получен патент Российской Федерации № 2412389 "Способ гашения крутильных колебаний трансмиссии транспортной машины".

УДК 621-027.31:621.7:621.9:621.396.67

С. Н. САЯПИН, д-р техн. наук (ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН), e-mail: S. Sayapin@rambler.ru

Универсальный быстро собираемый параболический рефлектор с регулируемой поверхностью для работы в СВЧ диапазоне

Представлены концепция построения и конструктор для модульной сборки универсального параболического прецизионного рефлектора для работы в СВЧ диапазоне, предназначенного для использования в наземных переносных и мобильных антеннах. Описан новый способ экспресс-юстировки рабочей поверхности рефлектора.

Ключевые слова: универсальный конструктор, модульная сборка, параболический рефлектор, экспресс-юстировка зеркальных антенн.

The concept of construction and constructor for modular assembly of universal parabolic precision reflector for operating in microwave band, intended for ground based portable and mobile antennas, is presented. The new method of express positioning of the reflector working surface is suggested.

Keywords: universal constructor, modular assembly, parabolic reflector, express positioning, mirror antenna.

В настоящее время в связи со стремительным развитием телекоммуникационных систем возникает потребность в быстро собираемых легких и жестких крупногабаритных (диаметром 3 м и более) параболических рефлекторах мобильных и переносных антенн СВЧ диапазона, которые при определенном качестве и соответственной настройке рабочей поверхности являлись бы и концентраторами солнечной энергии в составе автономных энергетических установок. Такие рефлекторы несмотря на большие размеры должны иметь небольшую массу и обладать достаточной жесткостью. Они должны легко и быстро собираться и разбираться без применения специальной оснастки. Антенны и энергетические установки данного типа необходимы прежде всего в отдаленных и труднодоступных районах, например геологам, погранич-

никам, скотоводам и т. п. Разработана конструкция быстро собираемого параболического рефлектора модульного типа, которую можно использовать в составе орбитальных космических антенн различного назначения. Данная конструкция, состоящая из мерных и регулируемых по длине стержней, позволяет получать осесимметричные и офсетные параболические рефлекторы, а также рефлекторы со сферической рабочей поверхностью.

Создание данного рефлектора осложнялось противоречивыми требованиями к конструкции: значительная жесткость при минимальной массе; точность и стабильность размеров при широком диапазоне эксплуатационных температур (от −70 до +120 °С в космических условиях и от −50 до +50 °С при эксплуатации на земле). При этом конструкция должна легко и быстро собираться и разбираться без применения специальной оснастки и при минимальных затратах на изготовление [1]. В табл. 1 приведены основные параметры предлагаемой конструкции и отечественных и зарубежных аналогов. Анализ конструкций космических антенн с рефлекторами, имеющими жесткую отражающую поверхность [2—5], показал, что предлагаемая конструкция превосходит по основным показателям выпускаемые отечественные и зарубежные устройства.

Минимизация затрат на изготовление рефлектора достигнута максимальным использованием в конструкции однотипных унифицированных и стандартных элементов, а также универсальной оснастки многоразового использования — матрицы для изготовления параболических фацет рабочей поверхности рефлектора — из таких высокомодульных полимерных композиционных материалов (ВПКМ), как стеклопластик, углепластик и др. [1, 6].

Универсальность предлагаемой конструкции заключается в возможности из набора одних и тех же элементов конструктора быстро собирать параболические или сферические рефлекторы с осесимметричной или офсетной рабочей поверхностью. Рассмотрим построение конструкций жестких прецизионных параболических рефлекторов малой массы для эксплуатации в космических и наземных условиях в составе осесимметричных или офсетных антенн, а также в качестве концентраторов солнечных энергетических установок [1]. Особенности построения конструкции разберем на примере жесткого несимметричного параболического рефлектора из углепластика, рабочая поверхность *1* которого образована пересечением параболоида вращения с фокусным расстоянием 3,5 м и цилиндра диаметром 3, 5 м (рис. 1). При этом ось цилиндра расположена параллельно фокальной оси и смещена от нее на 2 м.

Разработанная схема построения прецизионного параболического рефлектора модульного типа включает в себя формообразующие элементы двух уровней: точного и прецизионного. Формообразующий элемент точного уровня представляет собой собранный из пирамидальных модулей *5* (см. рис. 1) жесткий размеростабильный пространственный двухсетчатый ферменный каркас, все узлы рабочей поверхности *2* которого лежат на сфере, максимально аппроксимирующей рабочую поверхность *1* рефлектора. Формообразование прецизионного уровня включает выставление с заданной точностью на поверхности параболоида вращения реперных марок прецизионных юстировочных элементов и их фиксацию. К юстировочным элементам в виде стоек *4* с микрометрическими винтами крепят одну или несколько тонкостенных жестких параболических фацет, образующих рабочую поверхность рефлектора. При этом фацеты отформованы на матрице двойной кривизны [6], а их жесткость в направлении регулировки значительно меньше жесткости ферменного каркаса. Юстировочные операции обеспечивают требуемую геометрическую точность рабочей поверхности рефлектора, а большая жесткость и стабильность размеров ферменного каркаса поддерживают полученную

Таблица 1

Параметр	Предлагаемая конструкция	Антенна локатора (СССР) [2]	Зеркала параболические (Россия) [3]	Антенна КА "Викинг" (США) [4]	Рефлектор (Франция) [5]
Апертура:					
площадь A, м^2	11,18	8,4	0,28÷3,8	1,7	4,9
размеры, м	∅3,5	6×1,4	∅0,6÷2,2	∅3,5	∅2,5
Минимальная длина волны, см	1,2	8,0	1,2÷2,4	2,42	2,1
Масса M, кг	19,6	90,0	1,4÷19,0	4,75	19,0
Удельная масса M/A, кг/м^2	1,75	10,7	5	2,79	3,88
Конструктивное выполнение	Несимметричная вырезка из параболоида	Параболо-цилиндр	Осесимметричные и несимметричные вырезки из параболоида	Осесимметричная вырезка из параболоида	Несимметричная вырезка из параболоида

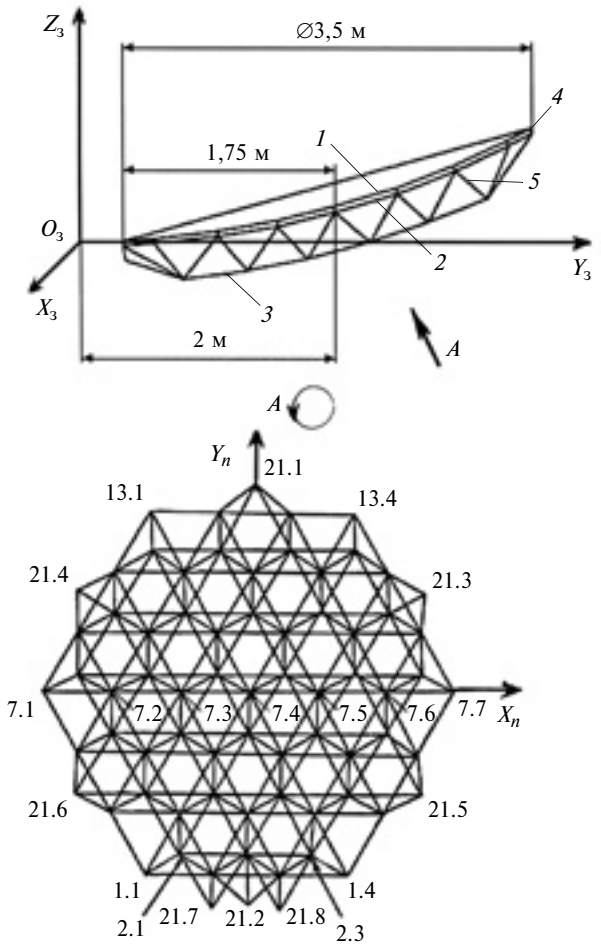


Рис. 1. Расчетная схема офсетного параболического рефлектора модульного типа:
1 и *2* — рабочие поверхности рефлектора и его каркаса; *3* — нерабочая поверхность каркаса; *4* — стойка; *5* — пирамидальный модуль

точность рефлектора в процессе его эксплуатации. Максимальная жесткость сферического ферменного каркаса достигается выполнением пирамидальных модулей в виде треугольных пирамид, близких к тетраэдрам.

Для получения минимальных удельной массы рефлектора — отношения его массы M к площади A апертуры зеркала, и температурных деформаций формообразующие элементы конструкции [стержни каркаса и оболочки (фацеты) параболической рабочей поверхности] изготовляют из углепластика, а узлы, законцовки и юстировочные элементы — из титана (возможно изготовление из магниевых сплавов и бериллия, а также из алюминиевых сплавов). Следует отметить, что основную массу углепластикового стержня небольшой длины составляют массы металлических законцовок и узлов крепления, поэтому оптимизация стержней по толщине стенки углепластиковых трубок не дает существенного эффекта, однако увеличивает число их типоразмеров, что значительно усложняет изготовление. Поэтому из условия технологичности конструкции все диагональные стержни (ребра пирамидальных модулей) выполнены одинаковыми.

Рассмотрим определение основных геометрических параметров рефлектора с учетом конструктивных особенностей и минимизации типоразмеров по длине стержней, образующих несущий каркас [1]. При расчетах использовали программу для решений систем нелинейных уравнений методом последовательных приближений. Расчетная схема рефлектора приведена на рис. 1. Сначала рассчитываем теоретические координаты узлов (точек пересечения осей сходящихся стержней каркаса) *1÷3* поверхностей рефлектора и точек пересечения осей стоек *4*, установленных в узлах рабочей поверхности *2* каркаса и направленных по нормали к рабочей поверхности *1* рефлектора. Число узлов рабочей поверхности каркаса рефлектора и связанных с ними узлов нерабочей поверхности, а также точек крепления фацет находим из условия минимальной достаточности. Расстояния между смежными узлами рабочей и нерабочей поверхностей каркаса определяют длины его стержней. Затем находим координаты точек начального ряда (в данном случае точек 7.1÷7.7 центрального ряда). Начальная точка ряда имеет нулевые координаты. Координаты последующих точек этого ряда рассчитываем из условий: точки находятся на поверхности сферы; расстояния между соседними точками одинаковы; координаты Y для указанных выше точек равны нулю.

Эти условия описывает система нелинейных уравнений:

$$(X_{i,j} - X_{i,j-1})^2 + (Y_{i,j} - Y_{i,j-1})^2 + \\ + (Z_{i,j} - Z_{i,j-1})^2 = L^2;$$

$$X_{i,j}^2 + Y_{i,j}^2 + (Z_{i,j} - R)^2 = R^2;$$

$$Y_{i,j} = 0,$$

где $X_{i,j}$, $Y_{i,j}$, $Z_{i,j}$ — координаты неизвестной точки; $X_{i,j-1}$, $Y_{i,j-1}$, $Z_{i,j-1}$ — координаты предыдущей известной точки; L — длина стержня; R — радиус сферы.

Далее рассчитываем координаты точек, начиная с точки 7.5 при известных координатах точки 7.4 до точки 7.7. Точки 7.1, 7.2, 7.3 симметричны соответственно точкам 7.6, 7.7, 7.5 по оси X_n относительно начала координат. Последующие ряды строим с помощью дополнительных точек, которые используем для построения нижней поверхности каркаса.

Определив координаты точек верхней и нижней поверхностей каркаса, осуществим перенос и поворот осей координат в точку $O_з$ системы координат $X_з$, $Y_з$, $Z_з$. Затем рассчитываем рабочую поверхность, которая имеет форму параболоида. Коорди-

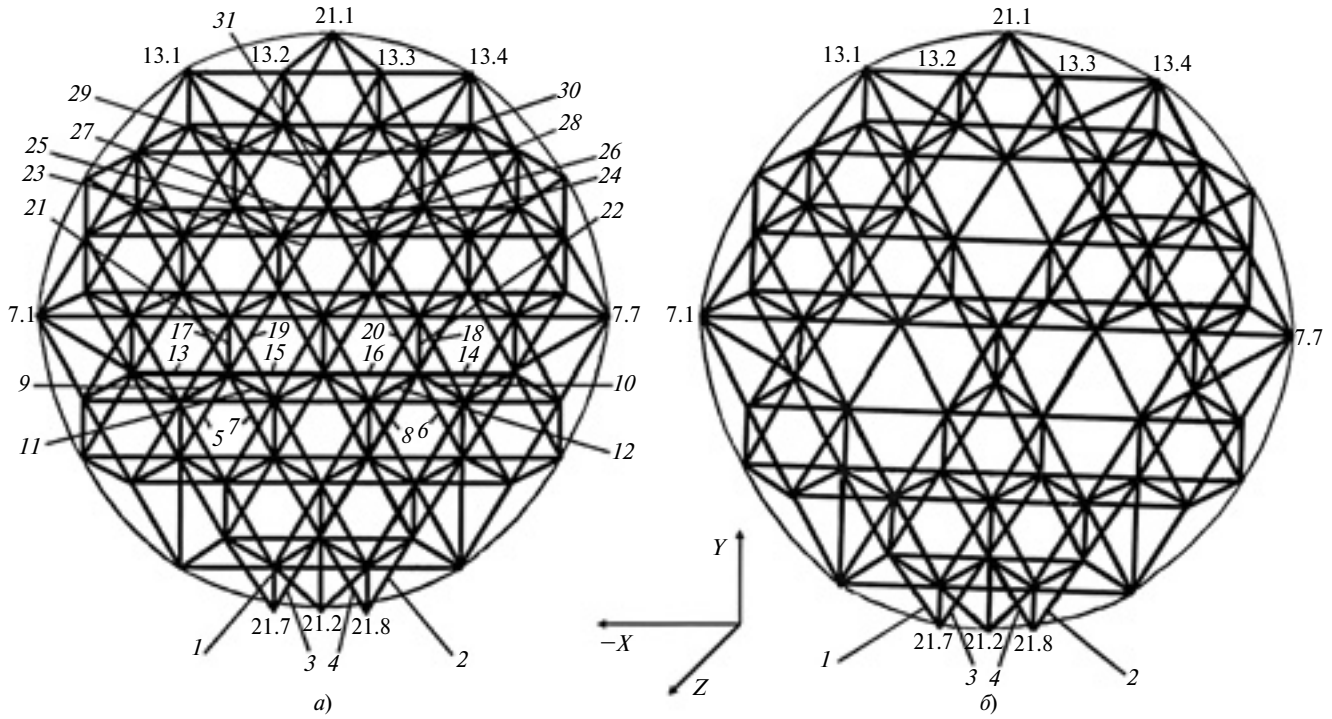


Рис. 2. Неразреженная (*а*) и разреженная (*б*) структуры каркаса рефлектора

наты параболоида задаются в точках пересечения прямой, соединяющей точки верхней поверхности с поверхностью параболоида. Далее рассчитываем расстояния между этими точками, значения которых необходимы для проектирования юстировочных узлов крепления рабочей поверхности центрального зеркала к несущему каркасу. Исходя из теоретической конструкции узла крепления рассчитываем теоретические длины всех стержней, образующих поверхности, и длины диагональных стержней, которые из условия технологичности должны быть одинаковыми. Далее эти стержни сортируем и группируем для определения числа типоразмеров стержней, которое должно быть минимальным. В конце программы рассчитываются углы подхода стержней к узлам.

С целью минимизации удельной массы рефлектора его каркас был выполнен по разреженной схеме [1]. В основу метода разрежения каркаса рефлектора положена возможность удаления определенным образом из пространственных стержневых покрытий строительных сооружений с тетраэдрной ячейкой групп стержней при сохранении несущей способности конструкции [7]. На рис. 2, *а* представлена неразреженная структура каркаса рефлектора, в которой стержни *5÷31* подлежат удалению, а на рис. 2, *б* — разреженная структура. Для проверки работоспособности полученной схемы выполнены расчеты рефлектора на прочность и жесткость (табл. 2, 3) [1], которые показали ее эффективность. Так, удаление из каркаса 27 стержней позволило практически при тех же деформациях формообразующей поверхности уменьшить массу рефлектора с 20,5 до 19,6 кг, расширить зоны обслуживания внутри конструкции, упростить ее и снизить трудоемкость изготовления.

Расчетная схема несущего каркаса рефлектора представляет собой набор тетраэдрных ячеек, элементы которых работают на растяжение—сжатие, изгиб и кручение. Рассматривали два варианта расчетных схем: первый — без разрежения структуры каркаса (см. рис. 2, *а*); второй — с разреже-

Таблица 2

Нагружение	Вариант расчетной схемы	Номер элемента	N, Н	M_1, Н · см	M_2, Н · см
В рабочем положении	1	1 2	1,56 −8,02	69,95 −69,46	22,65 18,45
	2	1 2	1,56 −8,02	69,96 −69,45	22,69 18,41
В транспортном положении	1	3 4	138,14 −139,01	−13,18 14,57	5,08 −3,70
	2	3 4	146,97 −147,79	−17,50 18,85	5,47 −3,67

Примечание. N — усилие, действующее вдоль стержня; M_1, M_2 — изгибающие моменты относительно местных осей *1* и *2* соответственно.

нием (см. рис. 2, *б*), выполненным удалением из первого варианта стержней *5÷31* (см. рис. 2, *а*).

Стержни каркаса рефлектора выполнены из углепластиковых трубок диаметром 10 мм со стенкой толщиной 1 мм. Трубки изготовлены продольно-поперечной намоткой на оправку углеленты ЛУП-0,2, пропитанной эпоксидным связующим ЭНФБ, ее опрессовкой, полимеризацией в печи и удалением оправки из трубки. При изготовлении длинномерных трубок (когда диаметр трубки значительно меньше длины и удаление оправки весьма затруднено или невозможно) был успешно применен способ, описанный в работе [8]. Рабочая поверхность рефлектора образована из отформованных фацет слоистой конструкции общей толщиной 0,8 мм. Каждый слой фацеты выполнен из углеткани УТ-900-2,5А, пропитанной эпоксидным связующим ЭНФБ. Углеткань выкладывали симметрично относительно нулевого слоя по схеме армирования "±45°". Упругие характеристики стержней определены по методике работы [9].

Элементы рефлектора, образующие верхнюю и нижнюю поверхности в расчетных схемах, рассматривали как ферменные, т. е. работающие только на растяжение—сжатие. Диагональные и периферийные элементы в расчетной схеме рассматривали как стержни, работающие на растяжение—сжатие, изгиб и кручение. Рабочую поверхность рефлектора в виде осенесимметричной вырезки диаметром 3,5 м из параболоида вращения в расчетных схемах рассматривали как набор треугольных пластин, жестко установленных на юстировочные узлы. Рефлектор в рабочем положении закрепляется по всем шести степеням свободы через три узла: 21.7, 21.2 и 21.8 (см. рис. 1, 2); в транспортном положении (кромка рабочей поверхности рефлектора параллельна оси $Z_з$, см. рис. 1) — дополнительно через узлы 7.1 и 7.7 (см. рис. 1, 2).

Таблица 3

Нагружение	Вариант расчетной схемы	Номер узла	*X*, см	*Y*, см	*Z*, см
В рабочем положении	1	13.1	0,0013	−0,0193	0,0724
		13.2	0,0013	−0,0184	0,0722
		13.3	0,0013	−0,0186	0,0719
		13.4	0,0013	−0,0197	0,0712
		21.1	0,0014	−0,0212	0,0779
	2	13.1	0,0013	−0,0193	0,0724
		13.2	0,0013	−0,0185	0,0723
		13.3	0,0013	−0,0186	0,0719
		13.4	0,0013	−0,0197	0,0713
		21.1	0,0014	−0,0213	0,0780
В транспортном положении	1	13.1	0,0128	0,0147	−0,0435
		13.2	0,0120	0,0160	−0,0531
		13.3	0,0170	0,0166	−0,0604
		13.4	0,0110	0,0185	−0,0637
		21.1	0,0139	0,0200	−0,0648
	2	13.1	0,0136	0,0195	−0,0609
		13.2	0,0124	0,0210	−0,0735
		13.3	0,0192	0,0218	−0,0820
		13.4	0,0112	0,0235	−0,0832
		21.1	0,0144	0,0270	−0,0896

С помощью комплексной программы рассчитывали напряженно-деформированное состояние (НДС) рефлектора от линейных нагрузок, равномерно распределенных по рабочей поверхности [1]. После определения НДС рефлектора проверяли условие прочности для наиболее нагруженных элементов по формулам:

$$\sigma_1^{ij} = E_1 \frac{N^j}{E_{пр}^j F^j}; \quad \sigma_2^{ij} = E_2 \frac{N^j}{E_{пр}^j F^j},$$

где σ_1^{ij} и σ_2^{ij} — напряжения соответственно вдоль и поперек волокна *i*-го слоя для *j*-го стержня; E_1, E_2 — модули Юнга вдоль и поперек волокон соответственно; $E_{пр}^j$, F^j, N^j — приведенный модуль Юнга, площадь поперечного сечения и усилие *j*-го стержня соответственно.

Условие прочности монослоя имеет вид:

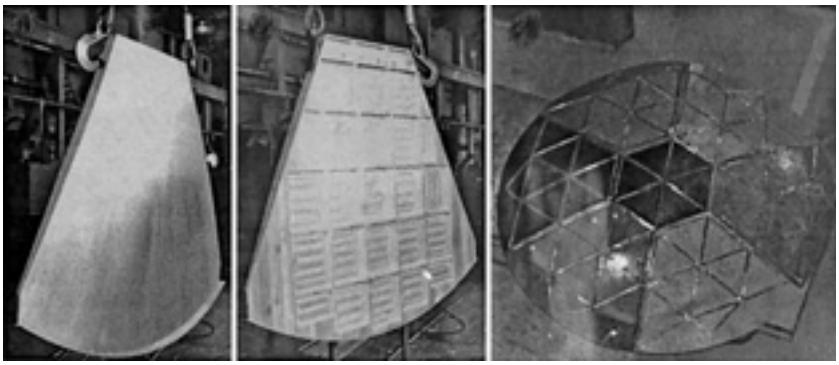
$$\sigma_1^{ij} < \sigma_{1в}; \quad \sigma_2^{ij} < \sigma_{2в},$$

где $\sigma_{1в}$ и $\sigma_{2в}$ — пределы прочности на растяжение и сжатие соответственно.

При расчетах НДС рефлектора в рабочем положении было принято максимальное ускорение 0,01*g*, в транспортном положении — ускорения 4,8*g*, 2*g* и −2*g* соответственно по осям *X*, *Y* и *Z*. Расчет фацет на прочность не проводили из-за незначительных в них напряжений.

Максимальные значения усилий в элементах приведены в табл. 2, а компонентов вектора перемещений *X*, *Y* и *Z* для характерных узлов — в табл. 3. Анализ результатов показал, что конструкция рефлектора с выбранной схемой разрежения удовлетворяет условиям прочности и жесткости.

В основе предлагаемой концепции создания параболического рефлектора лежит установка тонкостенных фацет двойной кривизны на выставленных в пространстве с заданной степенью точности юстировочных узлах жесткого и размеростабильного пространственного ферменного каркаса. Ввиду возможности юстировки рабочей поверхности фацет для изготовления последних не требуется высокоточная матрица двойной кривизны и для



а) *б*) *в*)

Рис. 3. Общий вид параболической матрицы с рабочей (*а*) и нерабочей (*б*) сторон и изготовленные на ней центральная и периферийные фацеты (*в*)

рефлектора с параболической офсетной поверхностью можно применять одинаковые периферийные фацеты. Так, центральная и периферийные фацеты рефлектора были изготовлены на одной и той же матрице двойной кривизны из алюминиевого сплава с выборками с тыльной стороны для обеспечения равномерного нагревания (рис. 3, *а*, *б*) [1, 6]. Фацеты рефлектора изготовляются на матрице двойной кривизны методом горячей (или холодной) полимеризации в автоклаве или в печи с опрессовкой вакуумным мешком. На рис. 3, *в* показаны центральная и шесть периферийных фацет, изготовленных из волокнистых полимерных композиционных материалов (ВПКМ) с разными наполнителями и схемами армирования, толщиной 0,8 мм. Лучшие показатели жесткости, точности и квазиизотропности механических характеристик в радиальных направлениях поверхности оболочки и ее геометрической стабильности получены у фацеты, изготовленной в автоклаве из углеткани УТ-900-2,5А.

Для реализации данной концепции автором разработан конструктор модульной сборки жестких прецизионных пространственных двухсетчатых ферменных каркасов зеркальных антенн (рис. 4, *а*), в который входят: треугольные пирамидальные модули *1* из углепластиковых диагональных стержней одинаковой длины, вершины которых с соединительными узлами *2* обращены к рабочей поверхности каркаса рефлектора; углепластиковые стержни *3* рабочей поверхности каркаса рефлектора, имеющие нерегулируемую длину и связывающие между собой пирамидальные модули *1* через соединительные узлы *2*; углепластиковые стержни *4* нерабочей поверхности каркаса рефлектора, имеющие регулируемую длину и связывающие между собой пирамидальные модули *1* через соединительные узлы *5*; юстировочные узлы *6*, каждый из которых устанавливается в соединительных узлах *2*. На рис. 4, *б* показан общий вид центральной части каркаса рефлектора с юстировочными узлами в виде микрометрического винта с опорным фланцем и подъемной гайкой. После сборки пирамидальных модулей и соединения их между собой по базовым поверхностям с помощью соединительных узлов и стержней мерной длины образуется жесткий пространственный ферменный каркас с низкой удельной плотностью и заданной двойной кривизной, например сферический, с прецизионными юстировочными узлами (рис. 5, *а*). На заключительном этапе выполняется термоциклирование собранного каркаса по заданной программе для снятия внутренних напряжений.

Фацеты на каркасе устанавливают в определенной последовательности [1]. Сначала торцы штифтов юстировочных узлов каркаса рефлектора выставляют на теоретической рабочей поверхности с точностью не хуже 0,1 мм и фиксируют. Затем отформованные фацеты, снабженные фланцами с посадочными отверстиями, устанавливают на центровочные штифты узлов юстировки и закрепляют. При этом каждое отверстие выполнено с гарантированным зазором, что обеспечивает посадку на штифт без напряжения. Крепление осуществляется со стороны рабочей поверхности зеркала антенны,

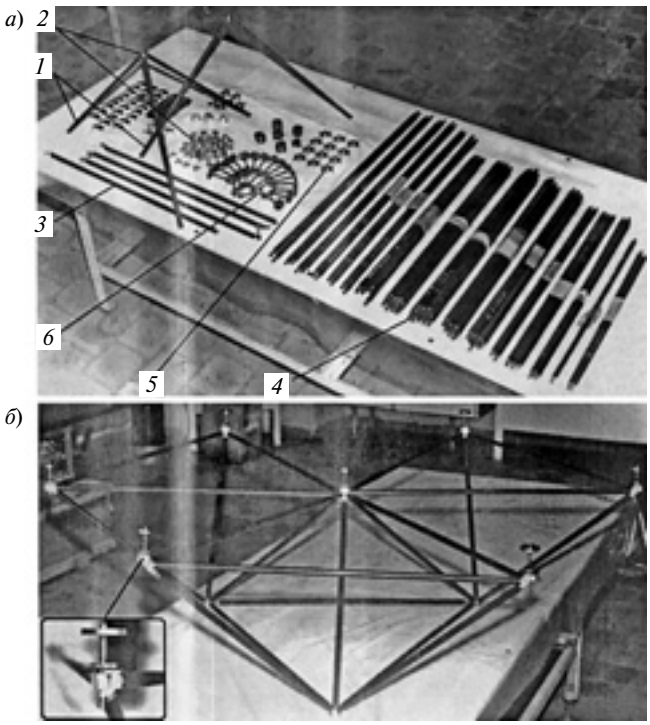


Рис. 4. Конструктор модульной сборки жестких прецизионных пространственных двухсетчатых ферменных каркасов зеркальных антенн (*а*) и общий вид центральной части каркаса с юстировочными узлами (*б*)

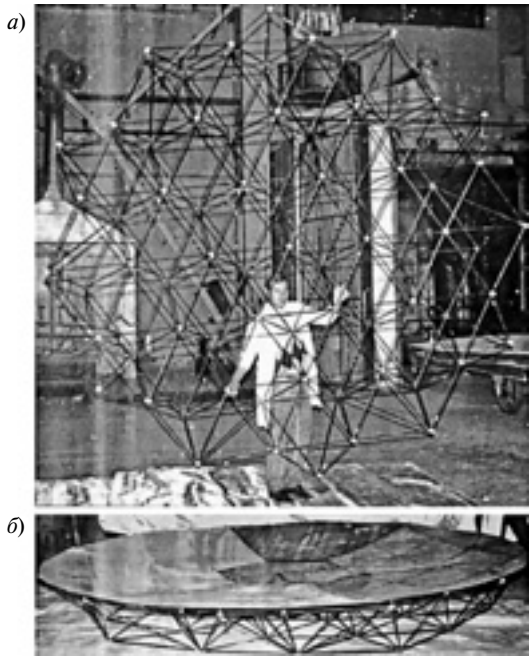


Рис. 5. Жесткий прецизионный неразреженный ферменный каркас двойной кривизны (*а*) и офсетный параболический рефлектор (*б*) диаметром 3,5 м

что упрощает сборку. Благодаря высокой жесткости каркаса рефлектора и низкой по сравнению с ней жесткости фацет требуемую точность рабочей поверхности рефлектора можно получить за одну установку юстировочных узлов. На рис. 5, *б* представлен собранный параболический рефлектор диаметром 3,5 м.

Юстировку рабочей поверхности рефлектора можно упростить с помощью разработанного способа экспресс-юстировки, при котором выставление опорных устройств юстировочных узлов не требует сборочных стапелей или сложной оснастки, что позволяет сделать юстировку мобильной и пригодной для реализации в полевых условиях [10]. На рис. 6 приведена схема юстировки опорного устройства фацеты (на рисунке не показана) рефлектора. Способ разработан из условия, что наилучшим положением микрометрического винта *3* юстировочного узла фацеты рефлектора является направление его оси вдоль нормали к отражающей поверхности, так как в случае отклонения от нормали рабочую поверхность рефлектора можно и не собрать ввиду того, что фацеты будут надвигаться друг на друга [11, с. 298]. Данное требование выполняется, как правило, или оптико-геодезической юстировкой, или применением специальных кондукторов, прикрепляемых к рабочему элементу флаг-шаблона [11, с. 298—300]. Основные недостатки оптико-геодезической юстировки: большая трудоемкость ввиду необходимости значительного объема вычислений для каждого положения реперных точек на опорном устройстве; применение специальной аппаратуры и поддержание необходимых условий при измерении. Недостатки юстировки с помощью кондукторов и флаг-шаблона: необходимость в флаг-шаблоне; котировочные работы по выставлению в пространстве специальных кондукторов на рабочем элементе флаг-шаблона, что трудоемко и требует специальных оснастки и оборудования.

Предлагаемый способ юстировки опорного устройства отражательного щита зеркальной антенны состоит в следующем. В узлах соединения стержней рабочей поверхности жесткого каркаса *1* (см. рис. 6) рефлектора устанавливают опорные устройства *2* фацет, самоустанавливающиеся под действием силы *F* вдоль линии, совпадающей с продольной осью винта *3* и проходящей через фокус *f* зеркала антенны. Это обеспечивается тем, что опорные устройства *2* выполнены в виде винтовых домкратов, каждый из которых представляет собой два сферических вкладыша *4*, плоские поверхности которых сопрягаются с узлами соедине-

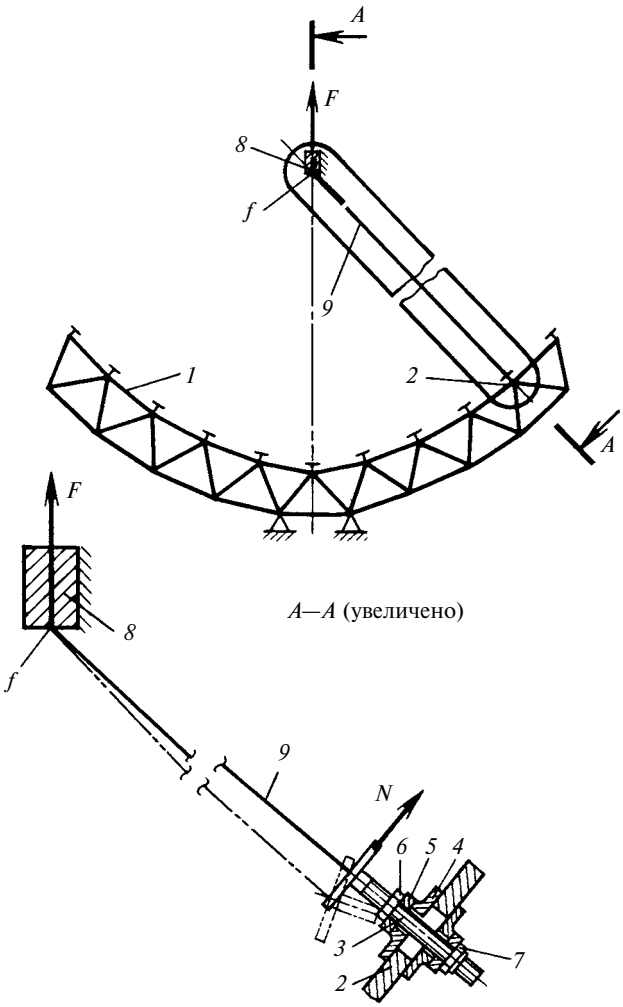


Рис. 6. Схема юстировки опорного устройства фацеты рефлектора

ния стержней каркаса *1* в местах установки винтовых домкратов, а сферические поверхности сопрягаются со сферическими поверхностями шайб *5*. Отверстия в сферических вкладышах *4* и узле соединения стержней каркаса *1* выполнены с гарантированным зазором, обеспечивающим необходимые подвижки опорного устройства *2*. Через отверстия сферических вкладышей *4* и шайб *5* проходит винт *3* с гайками *6* и *7*, что обеспечивает возможность стопорения узла и осевого перемещения винта *3*.

В фокусе *f* юстируемого зеркала антенны жестко устанавливают втулку *8* соосно фокальной оси, при этом фокус совпадает с точкой пересечения фокальной оси и торцевой поверхности втулки, обращенной к зеркалу антенны. Затем обеспечивают угловую подвижность юстируемого опорного устройства и прикрепляют в точке пересечения торцевой поверхности опорного фланца винта *3* домкрата с его осью один из концов гибкой связи *9*. Другой конец гибкой связи *9* пропускают сквозь отверстие втулки *8*, имеющее гарантированный зазор, и натягивают с усилием *F*, обеспечивающим под действием составляющей силы *N* угловую самоустановку оси винта *3* домкрата на фокус *f* с требуемой точностью. После этого определяют, например измерительной лентой из инвара, расстояние от фокуса до торцевой поверхности опорного фланца винта *3* домкрата, сравнивают его с расчетным значением и при необходимости выполняют осевое перемещение с помощью гаек *6* и *7*. Затягиванием гаек *6* и *7* контрят все подвижные соединения опорного устройства *2*. После юстировки и законтривания всех опорных устройств на них устанавливают фацеты и закрепляют.

С помощью разработанного конструктора можно формировать сферические каркасы двойной кривизны требуемой конфигурации в плане. При этом юстировочные узлы позволяют проводить настройку с заданной точностью требуемого профиля рабочей поверхности антенны. Модульность сборки обеспечивает изготовление как самостоятельных зеркальных антенн или гелиоконцентраторов, так и фрагментов рабочей поверхности складных крупногабаритных антенн различной конфигурации.

Основные характеристики рефлектора диаметром 3,5 м:

отклонение рабочей поверхности параболического рефлектора от теоретической — не более 0,5 мм, точность изготовления — не хуже 0,2 мм;

масса рефлектора — не более 20 кг;

собственная частота 1-го тона колебаний при консольном закреплении рефлектора — не менее 1,8 Гц.

Достигнутые стандартизация и унификация рефлектора характеризуются коэффициентами применяемости ($K_{пр}$) и повторяемости ($K_п$):

$$K_{пр} = \frac{N - n_0}{N} 100 = \frac{499 - 190}{499} 100 = 62\ \%;$$

$$K_п = \frac{N}{n} 100 = \frac{499}{13} 100 = 38\ \%,$$

где n_0 — число оригинальных составных частей рефлектора; N — общее число его составных частей; n — общее число типоразмеров составных частей рефлектора.

Большая жесткость в сочетании с прецизионностью, простота сборки, не требующая специальных стапелей, и низкая удельная масса предлагаемого рефлектора позволяют успешно использовать его в наземных переносных и мобильных антеннах: необходимо только нанести защитное покрытие с учетом климатических условий при эксплуатации.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Саяпин С. Н.** Анализ и синтез раскрываемых на орбите прецизионных крупногабаритных механизмов и конструкций космических радиотелескопов лепесткового типа: Дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2003. 446 с. Машинопись.

2. **Бортовая** антенна радиолокатора бокового обзора АМС "Венера 15" и "Венера 16". Антенны // Сб. статей. Вып. 33. М.: Радио и связь, 1986.

3. **http:**//comur-st.narod.ru//zerkala.htm.

4. **Зарубежная** радиоэлектроника. 1978. № 4. С. 131.

5. **Stella D., Morganti F., Nielsen G.** Contrave's antenna tip hinge mechanism for Selenia Spazio's 20/30 GHz antenna // Proc. 2nd ESA Workshop on Mechanical Technology for Antennas. ECTEC. Noordwijk. The Netherlands, 20—22 May 1986. ESA SP-261 (August 1986). P. 185—194.

6. **Саяпин С. Н.** Новый способ обработки поверхности второго порядка // СТИН. 2002. № 1. С. 30—32.

7. **Трущев А. Г.** Пространственные металлические конструкции. М.: Стройиздат, 1983. 215 с.

8. **Саяпин С. Н., Синев А. В.** Особенности изготовления полых изделий из композиционно-волокнистых материалов // Вестник машиностроения. 2000. № 12. С. 52—54.

9. **Образцов И. Ф., Васильев В. В., Буланов В. А.** Оптимальное армирование оболочек вращения из композиционных материалов. М.: Машиностроение, 1977. 145 с.

10. **Пат. Рос Федерации на изобретение № 2167473.** Способ юстировки опорного устройства отражательного щита зеркальной антенны.

11. **Поляк В. С., Бервалдс Э. Я.** Прецизионные конструкции зеркальных радиотелескопов. Рига: Зинатне, 1990. 526 с.

УДК 621.822.001.573

А. Ю. КОРНЕЕВ, канд. техн. наук (Государственный университет — УНПК, г. Орел), e-mail: komeev_andrey@mail.ru

Устойчивость жесткого ротора в конических подшипниках скольжения

Предложена методика анализа устойчивости жесткого ротора в конических подшипниках скольжения. Для одномассового ротора составлена система уравнений движения с использованием критерия Рауса—Гурвица и метода D-разбиений; определены оптимальные параметры для работы в устойчивом режиме.

Ключевые слова: устойчивость, конический подшипник скольжения, уравнения движения, критерий Рауса—Гурвица, метод D-разбиений.

The analysis method of rigid rotor stability in tapered sliding bearings is suggested. The system of motion equations for one-mass rotor, using Routh—Hurwitz criterion and D-decomposition method, is composed; the optimal parameters for operating in stable mode are determined.

Keywords: stability, tapered sliding bearing, equations of motion, Routh—Hurwitz criterion, D-decomposition method.

В конструкциях подвески роторных систем высокоскоростных турбомашин с большим ресурсом часто применяют опоры жидкостного трения. В этом случае при традиционной компоновке в подвеску входят опорный и упорный подшипники для компенсации соответственно радиальной и осевой составляющих внешней нагрузки. Однако для уменьшения габаритных размеров и массы машины при высоких частотах вращения ротора целесообразно применять конические опоры жидкостного трения, одновременно воспринимающие радиальную и осевую нагрузки [1—3]. Тогда одной из основных задач при проектировании является обеспечение устойчивости движения ротора высокоскоростной турбомашины [4—6], что связано с необходимостью установления динамических коэффициентов смазочного слоя, характеризующих его упругие и демпфирующие свойства. Математическая модель динамических характеристик конических подшипников скольжения (КПС) приведена в работах [2, 7—8].

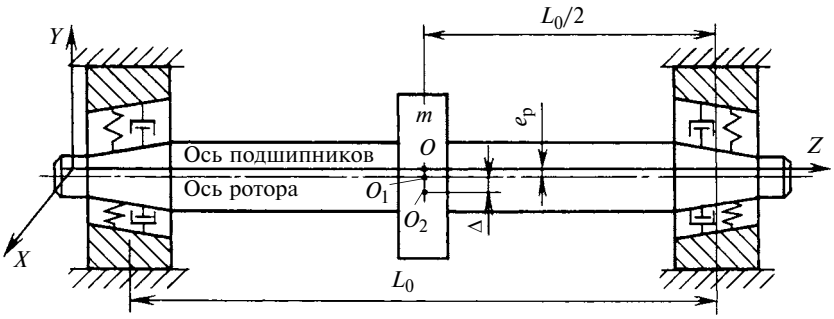


Рис. 1. Расчетная схема системы "жесткий ротор — КПС"

Расчетная схема системы "жесткий ротор — КПС" представлена на рис. 1.

Для определения устойчивости ротора составим уравнения его движения, используя метод Лагранжа [9]. Уравнения Лагранжа II рода для голономных систем с конечным числом n степеней свободы имеют вид [10]:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i; \quad i = \overline{1;\, n},$$

где $L = T - \Pi$ — функция Лагранжа (T и Π — соответственно кинетическая и потенциальная энергии системы; q_i и $\dot{q}_i$ — обобщенные координата и скорость в i-м направлении; Q_i — обобщенная сила; t — время.

В системе координат XOY (рис. 2) центр O_1 цапфы имеет координаты X и Y. Кинетическая энергия системы состоит из кинематических энергий поступательного ($T_{\text{п}O_2}$) и вращательного ($T_{\text{вр}O_2}$) движений центра O_2 масс:

$$T = T_{\text{п}O_2} + T_{\text{вр}O_2}.$$

Здесь $T_{\text{п}O_2} = 0{,}5mv_{O_2}^2$ (m — масса ротора, v_{O_2} — скорость центра масс); $T_{\text{вр}O_2} = 0{,}5J_m\omega^2 = \text{const}$ (J_m — момент инерции эксцентричного диска относительно центра масс).

Проекции скорости $\vec{V}_{O_2} = \vec{V}_{O_1} + \vec{V}_{O_2O_1}$ центра O_2 масс на неподвижные оси X, Y и Z имеют вид:

$$\left.\begin{aligned} V_{O_{2X}} &= \dot{X} + \Delta\omega\cos\omega t; \\ V_{O_{2Y}} &= \dot{Y} - \Delta\omega\sin\omega t; \\ V_{O_{2Z}} &= \dot{Z}, \end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где ω — угловая скорость ротора.

С учетом уравнений (1) кинетическая энергия описывается выражением:

$$T = \frac{1}{2}m[(\dot{X} + \Delta\omega\cos\omega t)^2 + (\dot{Y} - \Delta\omega\sin\omega t)^2 + \dot{Z}^2] + \frac{1}{2}J_m\omega^2,$$

где Δ — дисбаланс ротора.

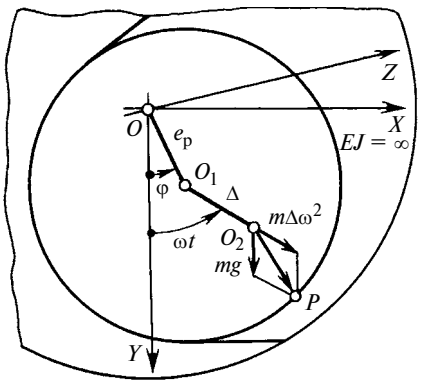


Рис. 2. Схема сил, действующих в жестком роторе

Потенциальную энергию системы составляет энергия центра масс в поле тяготения:

$$\ddot{I} = -mg[Y - \Delta(1 - \cos\omega t)].$$

Обобщенная сила Q в данном случае является суммой реакций R_i слоя смазочного материала, ее проекции на соответствующие оси имеют вид:

$$Q_X = \Sigma R_X; \quad Q_Y = \Sigma R_Y; \quad Q_Z = \Sigma R_Z.$$

Подставив полученные выражения для кинетической и потенциальной энергий, а также обобщенной силы в уравнения Лагранжа II рода для выбранных обобщенных координат X, Y, Z и выполнив некоторые преобразования, получим систему уравнений движения неуравновешенного жесткого ротора:

$$\begin{cases} m\ddot{X} = \Sigma R_X + m\Delta\omega^2 \sin\omega t; \\ m\ddot{Y} = \Sigma R_Y + m\Delta\omega^2 \cos\omega t + mg; \\ m\ddot{Z} = \Sigma R_Z. \end{cases} \quad (2)$$

Заменим параметры и переменные, входящие в систему (2) безразмерными комплексами:

$$\bar{X}\{\bar{Y}, \bar{Z}\} = \frac{X\{Y, Z\}}{h_0}; \quad \bar{R}_{X\{Y,Z\}} = \frac{R_{X\{Y,Z\}}}{p_0 r_0^2};$$

$$\bar{Q} = \frac{m\Delta\omega^2}{p_0 r_0^2}; \quad \bar{G} = \frac{mg}{p_0 r_0^2};$$

$$\Lambda = \frac{m h_0 \omega_0^2}{p_0 r_0^2}; \quad \bar{t} = \frac{t}{t_0}.$$

Здесь h_0 — средний радиальный зазор; p_0 — давление подачи смазочного материала; r_0 — длина образующей развертки конической поверхности от начала координат; Λ — приведенная масса, характеризующая инерционные свойства ротора; $t_0 = 1/\omega_0$ — относительное время; ω_0 — собственная частота (первая) ротора.

Тогда система уравнений движения примет вид (штрихи в индексе означают дифференцирование по относительному времени):

$$\begin{cases} \Lambda\bar{X}'' - \Sigma\bar{R}_X = \bar{Q}\sin\bar{t}; \\ \Lambda\bar{Y}'' - \Sigma\bar{R}_Y = \bar{Q}\cos\bar{t} + \bar{G}; \\ \Lambda\bar{Z}'' - \Sigma\bar{R}_Z = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Зная динамические коэффициенты слоя смазочного материала, можно решить задачу устойчивости движения ротора. Для анализа устойчивости ротора необходимо уравнение его возмущенного движения в окрестности положения равновесия [2, 6, 11]. Подставив выражения линеаризованных реакций смазочного слоя и возмущенных координат: $\bar{X} = \bar{X}_0 + \Delta\bar{X}$, $\bar{Y} = \bar{Y}_0 + \Delta\bar{Y}$ и $\bar{Z} = \bar{Z}_0 + \Delta\bar{Z}$, в систему (3) уравнений и вычтя из полученных уравнений уравнения равновесия (при $\bar{X} = \bar{X}_0$, $\bar{Y} = \bar{Y}_0$ и $\bar{Z} = \bar{Z}_0$), получим систему уравнений движения центра цапфы ротора в возмущениях, по которой можно судить об устойчивости исходной (нелинейной) системы (1) в первом приближении (знаки "Σ" опускаются, расчет ведется для одной опоры):

$$\begin{cases} \Lambda\Delta\bar{X}'' + \bar{K}_{XX}\Delta\bar{X} + \bar{K}_{XY}\Delta\bar{Y} + \bar{K}_{XZ}\Delta\bar{Z} + \\ \quad + \bar{B}_{XX}\Delta\bar{X}' + \bar{B}_{XY}\Delta\bar{Y}' + \bar{B}_{XZ}\Delta\bar{Z}' = 0; \\ \Lambda\Delta\bar{Y}'' + \bar{K}_{YX}\Delta\bar{X} + \bar{K}_{YY}\Delta\bar{Y} + \bar{K}_{YZ}\Delta\bar{Z} + \\ \quad + \bar{B}_{YX}\Delta\bar{X}' + \bar{B}_{YY}\Delta\bar{Y}' + \bar{B}_{YZ}\Delta\bar{Z}' = 0; \\ \Lambda\Delta\bar{Z}'' + \bar{K}_{ZX}\Delta\bar{X} + \bar{K}_{ZY}\Delta\bar{Y} + \bar{K}_{ZZ}\Delta\bar{Z} + \\ \quad + \bar{B}_{ZX}\Delta\bar{X}' + \bar{B}_{ZY}\Delta\bar{Y}' + \bar{B}_{ZZ}\Delta\bar{Z}' = 0. \end{cases} \quad (4)$$

Решение этой системы ищем в виде [2, 6, 7, 11]:

$$\Delta\bar{X} = A_X e^{\lambda\bar{t}}; \quad \Delta\bar{Y} = A_Y e^{\lambda\bar{t}}; \quad \Delta\bar{Z} = A_Z e^{\lambda\bar{t}}. \quad (5)$$

Здесь A_X, A_Y и A_Z — амплитуды возмущений в начальный момент времени ($t = 0$); $\lambda = \nu t_0 = \nu/\omega_0$; $\nu = s + ip$, где s и p — соответственно экспоненциальная (характеризует степень затухания колебаний) и гармоническая (характеризует частоту колебаний в системе) компоненты.

Подстановка выражений (5) в систему (4) и сокращение на $e^{\lambda\bar{t}}$ приводят к следующей системе

линейных алгебраических уравнений относительно A_X, A_Y и A_Z:

$$\begin{cases} A_X[\Lambda\lambda^2 + \bar{B}_{XX}\lambda + \bar{K}_{XX}] + A_Y[\bar{B}_{XY}\lambda + \bar{K}_{XY}] + \\ + A_Z[\bar{B}_{XZ}\lambda + \bar{K}_{XZ}] = 0; \\ A_X[\bar{B}_{YX}\lambda + \bar{K}_{YX}] + A_Y[\Lambda\lambda^2 + \bar{B}_{YY}\lambda + \bar{K}_{YY}] + \\ + A_Z[\bar{B}_{YZ}\lambda + \bar{K}_{YZ}] = 0; \\ A_X[\bar{B}_{ZX}\lambda + \bar{K}_{ZX}] + A_Y[\bar{B}_{ZY}\lambda + \bar{K}_{ZY}] + \\ + A_Z[\Lambda\lambda^2 + \bar{B}_{ZZ}\lambda + \bar{K}_{ZZ}] = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Система (6) уравнений имеет единственное решение, если ее определитель равен нулю, из чего следует характеристическое уравнение движения ротора:

$$a_0\lambda^6 + a_1\lambda^5 + a_2\lambda^4 + a_3\lambda^3 + a_4\lambda^2 + \\ + a_5\lambda + a_6 = 0. \quad (7)$$

Коэффициенты, входящие в уравнение (7), определяются выражениями:

$$a_0 = \Lambda^3; \quad a_1 = \Lambda^2[\bar{B}_{XX} + \bar{B}_{YY} + \bar{B}_{ZZ}];$$

$$a_2 = \Lambda^2[\bar{K}_{XX} + \bar{K}_{YY} + \bar{K}_{ZZ}] + \\ + \Lambda[\bar{B}_{XX}\bar{B}_{YY} + \bar{B}_{XX}\bar{B}_{ZZ} + \bar{B}_{YY}\bar{B}_{ZZ} - \\ - \bar{B}_{XY}\bar{B}_{YX} - \bar{B}_{XZ}\bar{B}_{ZX} - \bar{B}_{YZ}\bar{B}_{ZY}];$$

$$a_3 = \Lambda[\bar{B}_{XX}\bar{K}_{YY} + \bar{B}_{XX}\bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{YY}\bar{K}_{XX} + \\ + \bar{B}_{YY}\bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{XX} + \bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{YY} - \\ - \bar{B}_{XY}\bar{K}_{YX} - \bar{B}_{XZ}\bar{K}_{ZX} - \bar{B}_{YX}\bar{K}_{XY} - \\ - \bar{B}_{YZ}\bar{K}_{ZY} - \bar{B}_{ZX}\bar{K}_{XZ} - \bar{B}_{ZY}\bar{K}_{YZ}] + \\ + \bar{B}_{XX}\bar{B}_{YY}\bar{B}_{ZZ} + \bar{B}_{XY}\bar{B}_{YZ}\bar{B}_{ZX} + \\ + \bar{B}_{XZ}\bar{B}_{YX}\bar{B}_{ZY} - \bar{B}_{XX}\bar{B}_{YZ}\bar{B}_{ZY} - \\ \bar{B}_{XY}\bar{B}_{YX}\bar{B}_{ZZ} - \bar{B}_{XZ}\bar{B}_{YY}\bar{B}_{ZX};$$

$$a_4 = \Lambda[\bar{K}_{XX}\bar{K}_{YY} + \bar{K}_{XX}\bar{K}_{ZZ} + \bar{K}_{YY}\bar{K}_{ZZ} - \\ - \bar{K}_{XY}\bar{K}_{YX} - \bar{K}_{XZ}\bar{K}_{ZX} - \bar{K}_{YZ}\bar{K}_{ZY}] + \\ + \bar{B}_{XX}\bar{B}_{YY}\bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{XX}\bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{YY} + \\ + \bar{B}_{YY}\bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{XX} + \bar{B}_{XY}\bar{B}_{YZ}\bar{K}_{ZX} + \\ + \bar{B}_{XY}\bar{B}_{ZX}\bar{K}_{YZ} + \bar{B}_{XZ}\bar{B}_{YX}\bar{K}_{ZY} + \\ + \bar{B}_{XZ}\bar{B}_{ZY}\bar{K}_{YX} + \bar{B}_{YX}\bar{B}_{ZY}\bar{K}_{XZ} + \\ + \bar{B}_{YZ}\bar{B}_{ZX}\bar{K}_{XY} - \bar{B}_{XX}\bar{B}_{YZ}\bar{K}_{ZY} - \\ - \bar{B}_{XX}\bar{B}_{ZY}\bar{K}_{YZ} - \bar{B}_{XY}\bar{B}_{YX}\bar{K}_{ZZ} - \\ - \bar{B}_{XY}\bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{YX} - \bar{B}_{XZ}\bar{B}_{YY}\bar{K}_{ZX} - \\ - \bar{B}_{XZ}\bar{B}_{ZX}\bar{K}_{YY} - \bar{B}_{YX}\bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{XY} - \\ - \bar{B}_{YY}\bar{B}_{ZX}\bar{K}_{XZ} - \bar{B}_{YZ}\bar{B}_{ZY}\bar{K}_{XX};$$

$$a_5 = \bar{B}_{XX}\bar{K}_{YY}\bar{K}_{ZZ} + \bar{B}_{YY}\bar{K}_{XX}\bar{K}_{ZZ} + \\ + \bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{XX}\bar{K}_{YY} + \bar{B}_{XY}\bar{K}_{YZ}\bar{K}_{ZX} + \\ + \bar{B}_{XZ}\bar{K}_{YX}\bar{K}_{ZY} + \bar{B}_{YX}\bar{K}_{XZ}\bar{K}_{ZY} + \\ + \bar{B}_{YZ}\bar{K}_{XY}\bar{K}_{ZX} + \bar{B}_{ZX}\bar{K}_{XY}\bar{K}_{YZ} + \\ + \bar{B}_{ZY}\bar{K}_{XZ}\bar{K}_{YX} - \bar{B}_{XX}\bar{K}_{YZ}\bar{K}_{ZY} - \\ - \bar{B}_{XY}\bar{K}_{YX}\bar{K}_{ZZ} - \bar{B}_{XZ}\bar{K}_{YY}\bar{K}_{ZX} - \\ - \bar{B}_{YX}\bar{K}_{XY}\bar{K}_{ZZ} - \bar{B}_{YY}\bar{K}_{XZ}\bar{K}_{ZX} - \\ - \bar{B}_{YZ}\bar{K}_{XX}\bar{K}_{ZY} - \bar{B}_{ZX}\bar{K}_{XZ}\bar{K}_{YY} - \\ - \bar{B}_{ZY}\bar{K}_{XX}\bar{K}_{YZ} - \bar{B}_{ZZ}\bar{K}_{XY}\bar{K}_{YX};$$

$$a_6 = \bar{K}_{XX}\bar{K}_{YY}\bar{K}_{ZZ} + \bar{K}_{XY}\bar{K}_{YZ}\bar{K}_{ZX} + \\ + \bar{K}_{XZ}\bar{K}_{YX}\bar{K}_{ZY} - \bar{K}_{XX}\bar{K}_{YZ}\bar{K}_{ZY} - \\ \bar{K}_{XY}\bar{K}_{YX}\bar{K}_{ZZ} - \bar{K}_{XZ}\bar{K}_{YY}\bar{K}_{ZX}.$$

Динамические коэффициенты смазочного слоя в большом диапазоне относительного эксцентриситета (до $\bar{e}_p = 0{,}3$) для мало- и средненагруженных быстроходных роторов можно принять при концентричном положении ротора в подшипниках (при $\bar{e}_p = 0$) [2, 6—8]. В этом случае прямые коэффициенты жесткости и демпфирования в плоскости XY, а также перекрестные коэффициенты жесткости и демпфирования во всех остальных плоскостях равны [2, 6—8]:

$$\bar{K}_{XX} = \bar{K}_{YY} = \bar{K}_0; \quad \bar{K}_{ZZ} = \bar{K}_{0Z};$$

$$\bar{K}_{XY} = -\bar{K}_{YX} = \bar{K}_1; \quad \bar{K}_{XZ} = -\bar{K}_{ZX} = \bar{K}_2; \\ \bar{K}_{YZ} = -\bar{K}_{ZY} = \bar{K}_3;$$

$$\bar{B}_{XX} = \bar{B}_{YY} = \bar{B}_0; \quad \bar{B}_{ZZ} = \bar{B}_{0Z}; \\ \bar{B}_{XY} = -\bar{B}_{YX} = \bar{B}_1; \quad \bar{B}_{XZ} = -\bar{B}_{ZX} = \bar{B}_2; \\ \bar{B}_{YZ} = -\bar{B}_{ZY} - \bar{B}_3.$$

Тогда при центральном положении цапфы коэффициенты a_n характеристического уравнения примут вид:

$$a_0 = \Lambda^3; \quad a_1 = \Lambda^2[2\bar{B}_0 + \bar{B}_{0Z}];$$

$$a_2 = \Lambda[\Lambda(2\bar{K}_0 + \bar{K}_{0Z}) + \bar{B}_0(\bar{B}_0 + 2\bar{B}_{0Z}) + \\ + \bar{B}_1^2 + \bar{B}_2^2 + \bar{B}_3^2];$$

$$a_3 = 2\Lambda\left[\bar{B}_0\,\bar{K}_0\left(1+\frac{\bar{B}_{0Z}}{\bar{B}_0}+\frac{\bar{K}_{0Z}}{\bar{K}_0}\right)+\right.$$

$$\left.\bar{B}_1\,\bar{K}_1 + \bar{B}_2\,\bar{K}_2 + \bar{B}_3\,\bar{K}_3\right]+$$

$$+\ \bar{B}_{0Z}(\bar{B}_0^2 + \bar{B}_1^2) + \bar{B}_0(\bar{B}_2^2 + \bar{B}_3^2);$$

$$a_4 = \Lambda[\bar{K}_0(\bar{K}_0 + 2\bar{K}_{0Z}) + \bar{K}_1^2 + \bar{K}_2^2 + \bar{K}_3^2] +$$

$$+\ 2[\bar{B}_{0Z}(\bar{B}_0\,\bar{K}_0 + \bar{B}_1\,\bar{K}_1) +$$

$$+\ \bar{B}_0(\bar{B}_2\,\bar{K}_2 + \bar{B}_3\,\bar{K}_3)] + \bar{K}_{0Z}(\bar{B}_0^2 + \bar{B}_1^2) +$$

$$+\ \bar{K}_0(\bar{B}_2^2 + \bar{B}_3^2);$$

$$a_5 = 2[\bar{K}_{0Z}(\bar{B}_0\,\bar{K}_0 + \bar{B}_1\,\bar{K}_1) +$$

$$+\ \bar{K}_0(\bar{B}_2\,\bar{K}_2 + \bar{B}_3\,\bar{K}_3)] +$$

$$+\ \bar{B}_{0Z}(\bar{K}_0^2 + \bar{K}_1^2) + \bar{B}_0(\bar{K}_2^2 + \bar{K}_3^2\};$$

$$a_6 = \bar{K}_{0Z}(\bar{K}_0^2 + \bar{K}_1^2) + \bar{K}_0(\bar{K}_2^2 + \bar{K}_3^2).$$

Коэффициенты характеристического уравнения определяются коэффициентами жесткости и демпфирования: $a_n = f(\bar{K}_{IJ},\ \bar{B}_{IJ},\ \Lambda)$, а последние — геометрическими и рабочими параметрами конических подшипников жидкостного трения: $\bar{K}_{IJ},\ \bar{B}_{IJ} = f(R_1,\ R_2,\ L,\ \alpha,\ \omega,\ p_0,\ T_0,\ \mu,\ \rho$ и т. д.).

Для устойчивости системы необходимо и достаточно, чтобы все корни уравнения (7) имели отрицательную действительную часть [2, 6—8, 11]. Существуют две постановки задачи устойчивости: 1) заданы все параметры и определяется устойчиво ли данное состояние системы по критериям устойчивости Рауса—Гурвица, Найквиста, Михайлова и др.; 2) заданы некоторые параметры и определяется, при каких сочетаниях остальных параметров система устойчива, т. е. строят области устойчивости — метод D-разбиений).

При применении критерия Рауса—Гурвица строят матрицу Гурвица, которая для жесткого ротора имеет вид [2, 6, 11]:

$$\begin{bmatrix} a_1 & a_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_3 & a_2 & a_1 & a_0 & 0 & 0 \\ a_5 & a_4 & a_3 & a_2 & a_1 & a_0 \\ 0 & a_6 & a_5 & a_4 & a_3 & a_2 \\ 0 & 0 & 0 & a_6 & a_5 & a_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & a_6 \end{bmatrix}.$$

Необходимые и достаточные условия отрицательности действительной части корней λ и, следовательно, устойчивости системы выражаются в положительных значениях (при $a_0 > 0$) всех главных диагональных миноров матрицы Гурвица:

$$\Delta_1 = a_1 > 0;\quad \Delta_2 = a_1a_2 - a_0a_3 > 0;$$

$$\Delta_3 = a_1a_2a_3 + a_0a_1a_5 - a_1^2a_4 - a_0a_3^2 > 0;$$

$$\Delta_4 = a_1a_2a_3a_4 + a_0a_2a_3a_5 + 2a_0a_1a_4a_5 +$$

$$+\ a_1^2a_2a_6 - a_0a_1a_3a_6 - a_1a_2^2a_5 - a_0a_3^2a_4 -$$

$$-\ a_1^2a_4^2 - a_0^2a_5^2 > 0;$$

$$\Delta_5 = a_1a_2a_3a_4a_5 + 2a_1^2a_2a_5a_6 + a_1^2a_3a_4a_6 +$$

$$+\ 2a_0a_1a_4a_5^2 + a_0a_3^3a_6 + a_0a_2a_3a_5^2 - a_1a_2a_3^2a_6 -$$

$$-\ a_1a_2^2a_5^2 - a_1^2a_4^2a_5 - a_1^3a_6^2 - 3a_0a_1a_3a_5a_6 -$$

$$-\ a_0a_3^2a_4a_5 - a_0^2a_5^3 > 0;$$

$$\Delta_6 = a_6\Delta_5 > 0.$$

При расчете на компьютере устойчивости жесткого ротора, установленного на КПС, задают рабочие и геометрические параметры подшипника, массу ротора, приходящуюся на одну опору, и коэффициенты жесткости и демпфирования для данного подшипника. Далее рассчитывают: приведенную массу Λ ротора, коэффициенты a_i характеристического уравнения и главные диагональные миноры Δ_i матрицы Гурвица. Положительные значения миноров Δ_i указывают на устойчивость работы ротора в конических подшипниках скольжения при заданных параметрах.

Недостатки критерия Рауса—Гурвица — необходимость расчета определителей высокого порядка, что сложно даже с помощью компьютера, и то, что с помощью данного критерия можно выяснить, устойчива система или нет, но нельзя установить, как изменить параметры системы, чтобы сделать ее устойчивой.

При использовании метода D-разбиений в случае неустойчивости системы корни уравнения пересекают мнимую ось и переходят из левой в правую полуплоскость. При нахождении корней на мнимой оси действительная часть обращается в нуль ($s = 0$) и корни уравнения имеют вид: $\lambda = \gamma i$. Здесь $\gamma = p/\omega$ — относительная частота колебаний, где p — частота колебаний на границе устойчивости; ω — вынужденная частота колебаний. Для же-

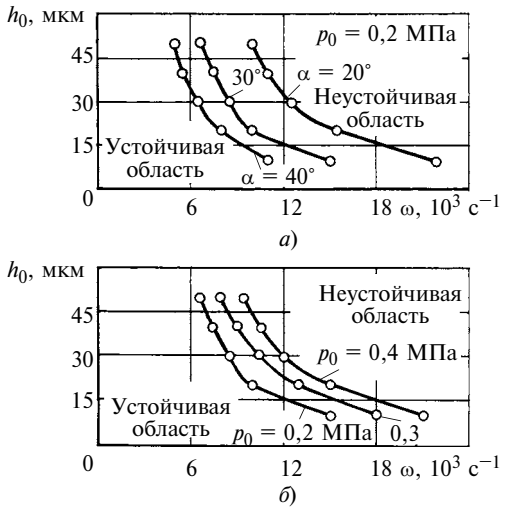


Рис. 3. Зависимости изменения радиального зазора h_0 от угловой скорости ω ротора, а также от угла α конусности КПС (*а*) и давления p_0 смазочного материала (*б*)

сткого ротора подстановкой $\lambda = \gamma i$ в уравнение (7) получаем систему уравнений

$$\begin{cases} -a_0\gamma^6 + a_2\gamma^4 - a_4\gamma^2 + a_6 = 0; \\ a_1\gamma^5 - a_3\gamma^3 + a_5\gamma = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Относительная частота колебаний определяется уравнением:

$$\gamma(a_1\gamma^4 - a_3\gamma^2 + a_5) = 0.$$

При $\gamma = 0$ коэффициент $a_6 = 0$, что характерно для систем с отрицательной жесткостью, которые в рассматриваемом объекте не встречаются. Тогда уравнение частоты автоколебаний на границе устойчивости имеет вид:

$$a_1\gamma^4 - a_3\gamma^2 + a_5 = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \gamma_{1,2}^2 = \frac{a_3 \pm \sqrt{a_3^2 - 4a_1a_5}}{2a_1}, \quad (9)$$

где a_n — коэффициенты характеристического уравнения (7).

Подставив значения коэффициентов a_n в уравнение (9) для общего случая и при центральном положении цапфы, получим соответствующие относительные частоты $\gamma_{1,2}^2$. Обозначив $\gamma_{1,2}^2 = a_*$, запишем выражение для границы устойчивости, которое согласно системе уравнений (8) имеет вид:

$$-a_0a_*^3 + a_2a_*^2 - a_4a_* + a_6 = 0.$$

При расчете областей устойчивой работы жестких роторов в КПС методом D-разбиений, изменяя значения угла α конусности КПС (рис. 3, *а*) и давления p_0 подачи смазочного материала (рис. 3, *б*), строят зависимости изменения радиального зазора h_0 от угловой скорости ω ротора, которые разделяют области устойчивой и неустойчивой работы жестких роторов.

Расчеты показали, что повышение давления смазочного материала, уменьшение радиального зазора и угла конусности положительно влияют на устойчивость работы роторов — зависимости $h_0 = f(\omega)$ сдвигаются в сторону увеличения угловой скорости ω.

Таким образом, предложенные расчеты устойчивости жесткого ротора на конических подшипниках скольжения позволяют оптимизировать параметры опор для устойчивой работы роторной системы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Максимов В. А., Баткис Г. С.** Трибология подшипников и уплотнений жидкостного трения высокоскоростных турбомашин. Казань: ФЭН, 1998. 428 с.

2. **Корнеев А. Ю., Савин Л. А., Соломин О. В.** Конические подшипники жидкостного трения. М.: Машиностроение-1, 2008. 172 с.

3. **Jayachandra Prabhu T., Ganesan N.** Characteristics of conical hydrostatic thrust bearings under rotation // Wear. 1981. V. 73. № 1. P. 95—122.

4. **Jayachandra Prabhu T., Ganesan N., Rao B. V. A.** Stability of vertical rotor system supported by hydrostatic thrust bearings // Proc. 6th World Congress "Theory Mach. and Mech." New Delhi. 1983. V. 2. P. 1339—1342.

5. **Позняк Э. Л.** Колебания роторов // Вибрации в технике. Т. 3. Колебания машин, конструкций и их элементов. М.: Машиностроение, 1980. С. 130—189.

6. **Корнеев А. Ю.** К вопросу об устойчивости роторов на конических опорах скольжения // Материалы междунар. науч.-техн. симпозиума "120 лет гидродинамической теории смазки". Орел: [Б. и.]. 2006. С. 588—596.

7. **Соломин О. В., Корнеев А. Ю.** Динамические характеристики конических опор жидкостного трения // Вестник машиностроения. 2006. № 12. С. 31—37.

8. **Корнеев А. Ю., Ярославцев М. М.** Динамические характеристики конических многоклиновых гидродинамических опор жидкостного трения // Вестник машиностроения. 2010. № 4. С. 52—57.

9. **Бутенин Н. В., Фуфаев Н. А.** Введение в аналитическую механику. М.: Наука, 1991. 256 с.

10. **Бидерман В. Л.** Теория механических колебаний. М.: Высшая школа, 1980. 408 с.

11. **Меркин Д. Р.** Введение в теорию устойчивости движения. М.: Наука, 1987. 304 с.

УДК 62-235

И. К. АЛЕКСАНДРОВ, д-р техн. наук (Вологодский ГТУ),
e-mail: alex@mh.vstu.edu.ru

Определение величины проскальзывания тела качения в шариковом подшипнике

Рассматриваются условия качения тела в шариковом подшипнике.
Ключевые слова: шариковый подшипник, тело качения, скольжение.

The conditions of element rolling in ball bearing are considered.
Keywords: ball bearing, rolling element, sliding.

Взаимному проскальзыванию контактирующих поверхностей при качении шарика в подшипнике уделено внимание во многих работах, например в работе Д. Н. Гаркунова[1]. При качении шарика по желобу окружность *AB* перемещается по середине канавки, а окружность *CD* касается ее края (рис. 1). Очевидно, что за один оборот шарика окружность *AB* пройдет большее расстояние, чем окружность *CD*. Эта разница и обусловливает скольжение поверхностей трения. Таково общепринятое мнение. Проанализируем качение шарика по желобу более детально.

Рассмотрим изменение окружной скорости поверхности шарика при качении. Полагаем, что шарик перемещается по желобу со скоростью v — переносной скоростью центра тяжести шарика, и вращается в вертикальной плоскости вокруг оси X (рис. 2). Принимаем условие: окружная скорость $v_{шA}$ поверхности шарика в вертикальном сечении, проходящем через точку A, равна его переносной скорости v, т. е. $v = v_{шA}$. При этом условии скорость $v_{шA}$ будет максимальной. При удалении (в обе стороны) вертикального сечения шарика от центрального, проходящего через точку A, и приближении этого сечения к точкам x_1 или x_2 скорость $v_{шA}$ будет стремиться к нулю. Изменение окружной скорости поверхности шарика относительно горизонтальной оси X определяем по формуле $v_{ш i} = \omega r \sin\alpha$, где $v_{ш i}$ — окружная скорость поверхности шарика в i-м вертикальном сечении; ω — угловая скорость шарика.

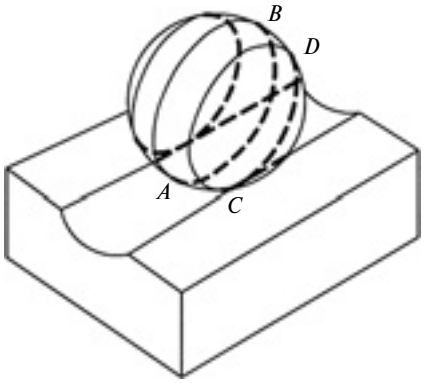


Рис. 1. Схема качения шарика по канавке

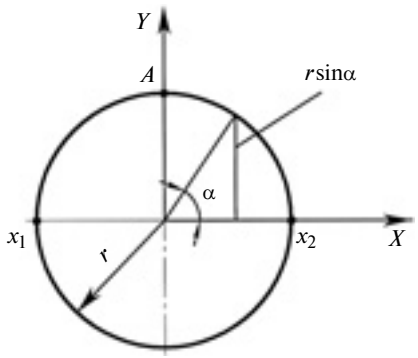


Рис. 2. Схема для определения окружной скорости поверхности шарика

Очевидно, что при контакте со стенкой желоба точки шарика, окружная скорость которой существенно меньше скорости v, произойдет проскальзывание контактирующих поверхностей и возникнет импульс для вращения шарика в горизонтальной плоскости. Рассмотрим это положение, исходя только из условия неизменного вращения шарика в вертикальной плоскости (вокруг оси X).

Обратим внимание на то, что представленные на рис. 1 условия качения шарика в канавке рассматриваются в работе Гаркунова[1] отвлеченно, без учета ее криволинейности, т. е. по умолчанию предполагается, что участок желоба, по которому катится шарик, — прямолинейный. В реальных условиях канавка имеет криволинейную форму, а точнее, — представляет собой часть поверхности тора (рис. 3). Естественно, что условия качения шарика по тору отличаются от качения по прямолинейному желобу.

Отметим, что при качении шарика без скольжения по тору с опорой на периферийную часть его поверхности, т. е. на наружное кольцо подшипника, окружность (см. рис. 1) *AB* шарика должна проходить больший путь, чем окружность *CD*. Следовательно, в данном случае тороидальная поверхность канавки в определенной степени компенсирует буксование шарика. Определим зависимость величины буксования шарика от геометрических параметров подшипника качения. Обозначим необходимые для решения задачи геометрические параметры подшипника: R_1 и R_2 — максимальный и минимальный радиусы наружного кольца подшипника (см. рис. 3); r — радиус шарика (см. рис. 2);

[1] **Гаркунов Д. Н.** Триботехника. М.: Машиностроение, 1985. 424 с.

h — высота канавки; $L_1 = 2\pi R_1$ и $L_2 = 2\pi(R_1 - h)$ — длины окружности тора соответственно по максимальному и минимальному радиусам. Очевидно, что $R_2 = R_1 - h$.

Компенсирующий коэффициент, допускающий расхождение окружных скоростей при качении тела по тору при отсутствии буксования, определим по формуле:

$$K_к = L_2/L_1 = (R_1 - h)/R_1. \quad (1)$$

В численном выражении, приняв $R_1 = 5r$, $r = 1$ и $h = 0{,}3r$, получим $K_к = (5 - 0{,}3)/5 = 0{,}94$. Теоретически следует признать допустимым уменьшение скорости поверхности тела при качении по минимальному радиусу R_2 наружного кольца. Согласно формуле (1) для данного примера $K_к = 6$ %.

Теперь определим, насколько возможно выполнить данное условие для реальной конструкции подшипника. Шарик, двигаясь по наружному кольцу без скольжения и контактируя с ним по окружности AB, должен совершить $n_1 = L_1/2\pi r = R_1/r$ оборотов, а контактируя по окружности CD, — $n_2 = R_1 - h/(r - h)$ оборотов.

При условии $n_1 = n_2$ обеспечивается качение шарика без скольжения, но это условие невыполнимо. Поэтому необходимо считаться с наличием скольжения в данной паре трения и оценивать его, используя коэффициент буксования:

$$K_б = n_1/n_2 = R_1(r - h)/[r(R_1 - h)]. \quad (2)$$

В численном выражении получим: $K_б = 5(1 - 0{,}3)/[1(5 - 0{,}3)] = 0{,}7778$. Видим, что реальный коэффициент буксования существенно отличается от единицы. Возникает вопрос: при каких соотношениях геометрических параметров подшипника возможно качение шарика без скольжения? Только при условии $n_1 = n_2$. Решим уравнение $R_1/r = R_1 - h/(r - h)$ относительно h и получим неутешительный результат: $h = R_1 r - R_1 r/(R_1 - 1)$, т. е. условие выполняется только при отсутствии канавки. Еще менее утешительны результаты при качении шарика по внутреннему кольцу подшипника. В данном случае имеем отрицательный компенсирующий эффект, так как при качении без скольжения по окружности AB шарик должен проходить меньший путь, чем при качении по окружности CD, что в принципе невозможно. Следовательно, качение шарика по внутреннему кольцу без буксования невозможно по определению.

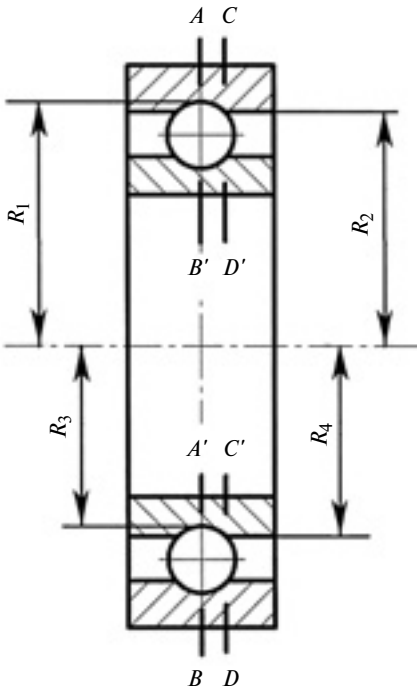


Рис. 3. Схема для определения радиусов поверхностей качения подшипника по наружному и внутреннему кольцам подшипника

Оценим качение шарика по внутреннему кольцу. Обозначим: $R_3 = R_1 - r$ и $R_4 = R_1 - 2r + h$ — соответственно минимальный и максимальный радиусы внутреннего кольца подшипника. Определим компенсирующий коэффициент (для внутреннего кольца лучше применить понятие — "усугубляющий коэффициент"):

$$K_к = R_4/R_3 = R_1 - 2r + h/(R_1 - 2r).$$

В численном выражении получим:

$$K_к = 5 - 2 + 0{,}3/(5 - 2) = 1{,}1.$$

Определим коэффициент буксования при качении шарика по внутреннему кольцу:

$$K_б = n_3/n_4 = (R_1 - 2r) \times (r - h)/[r(R_1 - 2r + h)], \quad (3)$$

где n_3 и n_4 — число оборотов шарика при качении по внутреннему кольцу без скольжения соответственно по окружностям $A'B'$ и $C'D'$.

В численном выражении получим:

$$K_б = (5 - 2)(1 - 0{,}3)/1(5 - 2 + 0{,}3) = 0{,}6364.$$

Расчет показал: при принятых параметрах подшипника при качении шарика по внутреннему кольцу буксование увеличивается на 18,2 % по сравнению с буксованием при качении по внешнему кольцу. Полностью избавиться от буксования в шариковом подшипнике нельзя, но можно провести определенные оптимизационные мероприятия, используя соотношения (2) и (3).

УДК 658.527.011

А. А. ИВАНОВ, д-р техн. наук (Нижегородский ГТУ им. Р. Е. Алексеева), e-mail: ivanov_aa@nntu.nnov.ru

Промышленные роботы в транспортно-накопительной системе

Рассмотрены схемы организации грузопотоков между автоматизированным складом и производственными участками с помощью транспортных роботов.

Ключевые слова: транспортный робот, автоматизированный склад, конвейер, грузопоток.

The organization schemes of cargo traffic between automated warehouse and production sectors with the help of carrying robots are considered.

Keywords: carrying robot, automated warehouse, conveyor, cargo traffic.

Основная задача промышленных роботов (ПР) при автоматизации транспортно-складских работ — обеспечение связи между транспортными потоками и технологическими операциями, а также автоматизация переработки грузов. Наиболее широкое применение ПР находят при замене человека на погрузочно-разгрузочных операциях, связывающих транспортно-грузовые потоки, — это перенос объектов с одного конвейера на другой, съем деталей с конвейера и укладка их в тару для упаковки [1—3].

Типичный пример использования ПР для передачи детали с подвесного на напольный конвейер показан на рис. 1. По сигналу датчика о наличии детали *1* на подвесном конвейере робот *2* начинает движение из крайнего правого положения. Когда его скорость станет равной скорости конвейера, он снимает деталь с подвески и переносит ее на напольный конвейер *3*. Затем робот возвращается в исходное положение и цикл повторяется. Такое использование ПР имеет место при подаче деталей на сборку напольным конвейером после окраски и сушки в камерах, откуда они забираются подвесным конвейером.

Другой пример — перегрузка деталей с напольного конвейера на подвесной конвейер (рис. 2). Тактовый напольный конвейер *7* доставляет детали *5* в спутниках *6* в зону перегрузки. Подъемник *4* доставляет их к вакуумному захвату перегрузочного робота *3*, который по монорельсу *2* переносит деталь к подвесному конвейеру *1*, движущемуся перпендикулярно монорельсу с постоянной скоростью. При движении по монорельсу рука робота *3* с деталью разворачивается на 180° в горизонтальной плоскости, затем входит в зону между подвесками *8* конвейера *1* и устанавливает деталь на одну из них. В этот момент линейная скорость поворота захвата робота совпадает со скоростью подвесного конвейера.

Грузопотоки между автоматизированными складами (АС) и производственными участками можно организовать с помощью подвесных и напольных транспортных роботов (ТР). Подвесные ТР — консервативные транспортные системы, поэтому большее применение находят напольные ТР [1, 2]. Транспортный робот (рис. 3) в виде автономной тележки *1* на операциях загрузки/разгрузки взаимодействует с приемно-передающим устройством *3* (ППУ) АС *4*, с одной стороны, и операционными накопителями (ОН) станков *2* производственного участка, с другой стороны. Съем и доставку грузов на ППУ осуществляет робот-штабелер *5*. На больших складах используют несколько штабелеров.

Две схемы загрузки/разгрузки ППУ и ОН представлены на рис. 4. ОН представляет собой стационарную платформу *4* (рис. 4, *а*), ТР *1* с грузонесущей платформой *2* вертикального хода въезжает между стеллажами *3* и опускает на них платформу с грузом *5* — загрузка выполнена. Аналогично осуществляется разгрузка. Для ОН с поворотной вильчатой платформой *7* используют тот же ТР (рис. 4, *б*). Платформа *7* с заготовками *6* и деталями *8* поворачивается в горизонтальной плоскости на 180°.

На рис. 5 приведен вариант компоновки автономной тележки ТР с поднимающейся платформой: два ведущих колеса *5* расположены в ее средней части у бортов, два опорных колеса *2* — по

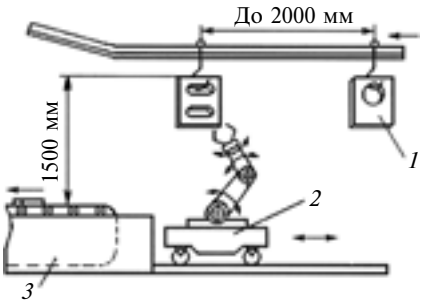


Рис. 1. Схема перегрузки деталей с подвесного конвейера на напольный с помощью ПР

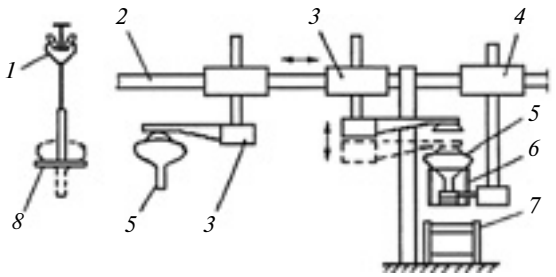


Рис. 2. Схема перегрузки деталей с напольного конвейера на подвесной с помощью ПР

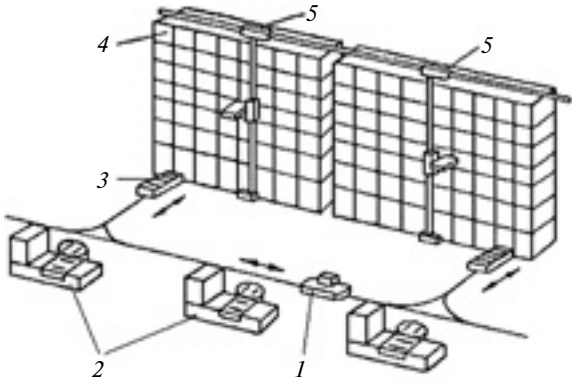
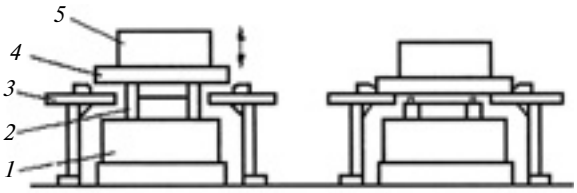
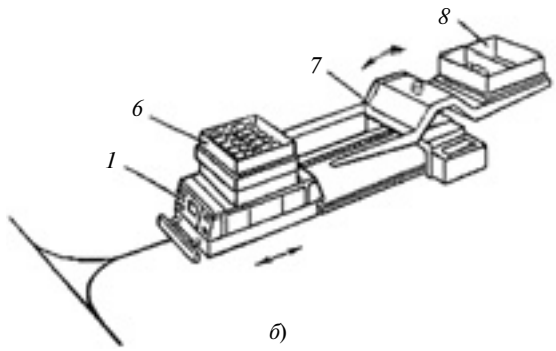


Рис. 3. Схема организации грузопотоков между АС и производственными участками с помощью ТР



а)



б)

Рис. 4. Схемы загрузки-разгрузки ППУ и ОН со стационарной (*а*) и поворотной (*б*) платформами

концам продольной оси. Вращающий момент на ведущие колеса передается от электродвигателей *8* через электромагнитные муфты *6*. Электродвигатель *3* подъема платформы расположен вертикально и передает движение через цепь *4*. На одном конце тележки размещен бортовой программируемый контроллер (ПК), на другом — комплект аккумуляторов *10* и преобразователь *11* для питания ПК. На тележке с двух сторон установлены 16-разрядные фотодатчики *1* слежения за трассой, устройства *7* подключения к сети для подзарядки аккумуляторов и счетчик *9* пройденного пути. Средняя скорость ТР — 1 м/с, максимальная масса с грузом — 1 т, радиус поворота — 1,2 м. Робот может поворачиваться на месте вокруг вертикальной оси.

На рис. 6 приведена схема движения безрельсового ТР *3* по заданной трассе с использованием системы фотоэлементов *4*, на которые попадает луч, отраженный от полосы *2*, уложенной вдоль путепровода. Источник света *1* и ряд фотоэлементов расположены в нижней части тележки перпендикулярно к направлению ее движения. Яркость луча, отраженного от ленты, соответствует сигналу "1", а отраженного от путепровода — сигналу "0". При повороте ленты влево включается левая группа фотоэлементов и тележка поворачивает влево. Если лента имеет более широкий участок, то срабатывает большее число фотоэлементов, которые формируют команду на останов ТР. Если сигналы от фотоэлементов в систему управления не поступают, это означает, что ТР сошел с ленты и выдается команда на его останов. Система управления ТР может работать по нескольким программ.

В машиностроении наибольшее распространение получили склады, состоящие из стеллажей *1* модульного типа, робота-штабелера *2*, ППУ *6* и системы управления (рис. 7). Стеллажный штабелер позволяет обслуживать ячейки двух параллельных стеллажей. Его колонна движется по нижним рельсам, а направляющие колонны смонтированы на стеллажном каркасе [1, 2].

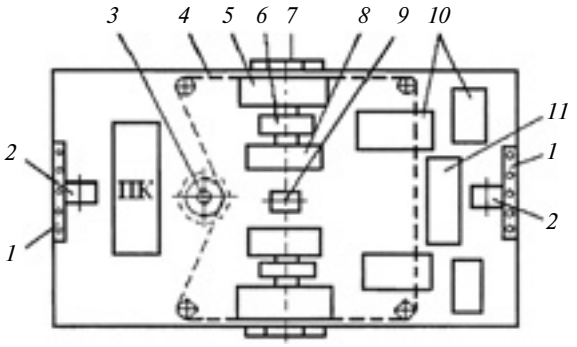


Рис. 5. Компоновка автономной тележки ТР с поднимающейся грузонесущей платформой

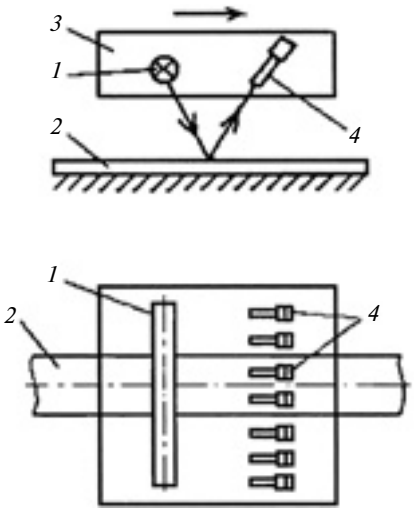


Рис. 6. Схема напольного ТР, движение которого управляется светоотражающей полосой

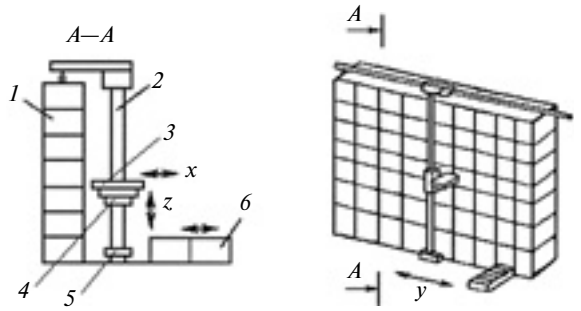


Рис. 7. Схема АС со стеллажным роботом-штабелером:
1 — стеллаж; *2* — штабелер; *3* — захват; *4* — каретка перемещения захвата по колонне; *5* — рельсовая тележка; *6* — ППУ

Выпускают штабелеры грузоподъемностью 50, 150, 250, 500 и 1000 кг. Приводы штабелера обеспечивают необходимые скорости перемещения захвата: вдоль стеллажа — от 15 м/мин (для небольших АС) до 125 м/мин (для больших АС); вдоль колонны — от 9 до 25 м/мин; при входе захвата в ячейку — от 0,7 до 8 м/мин. Для заготовок, закрепленных на спутнике, или ящичной тары на поддоне используют захват вильчатого типа с точностью позиционирования ±1,0 мм. Перемещения захвата по горизонтали и вертикали контролируются вращающимися трансформаторами ВТМ-1В, установленными на конечных звеньях червячных редукторов. Средняя производительность стеллажных АС — 120÷200 адресов за семичасовую смену (или два адреса в минуту). На операциях упаковки штучной продукции ПР используют для ориентированной укладки изделий в мерную тару.

Рассмотренные схемные решения подтверждают эффективность применения ПР при организации грузопотоков в автоматизированном производстве с использованием средств непрерывного, дискретного транспорта и автоматизированных складов-накопителей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Иванов А. А.** Основы робототехники: Учеб. пособие. М.: ФОРУМ, 2012. 224 с.
2. **Козырев Ю. Г.** Промышленные роботы: Справочник. М.: Машиностроение, 1988. 376 с.
3. **Попов Е. П., Письменный Г. В.** Основы робототехники. Введение в специальность: Учебник. М.: Высшая школа, 1990. 224 с.

УДК 621.99:621.785

В. М. ЯНКО, канд. техн. наук (Курганский ГУ), e-mail: fizika@kgsu.ru

Поверхностная обработка резьбы на титановых трубах для повышения надежности и долговечности соединений

Рассматриваются способы поверхностной обработки деталей из титана, предотвращающие схватывание и повышающие их износостойкость. Приводятся результаты стендовых испытаний резьбовых соединений титановых труб с модифицированной поверхностью.

Ключевые слова: титан, трубная резьба, поверхностная обработка, стендовые испытания, свинчивание, развинчивание.

The ways of surface treatment of titanium parts, preventing seizure and improving their wear resistance, are considered. The results of benchmark tests of threaded joints of titanium tubes with modified surface are presented.

Keywords: titanium, pipe thread, surface treatment, benchmark tests, screwing, breakout.

Известны три основных способа соединения труб: фланцевое, сварное и резьбовое. Каждое из них имеет свои достоинства, недостатки и технические условия применения.

Использование резьбовых соединений труб технологически и экономически оправдано, когда технические условия ограничивают поперечные размеры трубопровода (например, для насосно-компрессорных труб внутри обсадных труб) в условиях неоднократного свинчивания, демонтажа и перемещения элементов трубопровода. Так, при транспортировке экологически опасных жидких веществ резьбовые соединения должны иметь повышенную герметичность, а материалы труб — высокую коррозионную стойкость (например, как у титана и титановых сплавов).

Применение титана в резьбовых соединениях труб осложняется склонностью сопрягаемых поверхностей к контактному налипанию (схватыванию) и холодной сварке при трении, особенно в условиях тяжелого нагружения. В этом случае при развинчивании поверхность резьбовых витков разрушается и повторное свинчивание невозможно.

Известны разные способы поверхностного упрочнения деталей из титана, среди которых преобладают термическая (ТО) и химико-термическая (ХТО) обработки. Из большого числа способов ТО и ХТО отметим те, которые препятствуют схватыванию и повышают износостойкость, — это оксидирование, азотирование, селенирование, цианирование, борирование, никелирование [1], а также обработка деталей из титана в расплаве йодистых солей калия и кадмия [2]. Применение того или иного способа поверхностной обработки деталей из титана зависит от конкретных условий эксплуа-

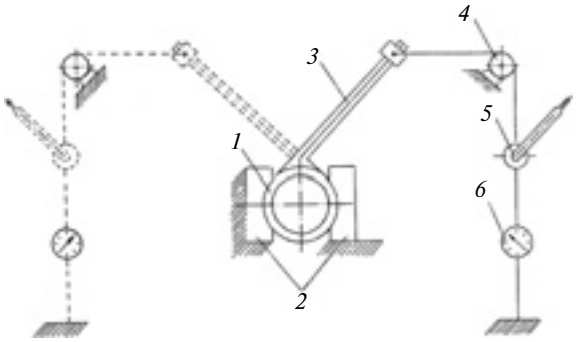


Схема стенда для испытания трубной резьбы на работоспособность при неоднократном свинчивании

тации: удельной нагрузки и ее распределения по поверхности трения; формы сопряжения трущихся поверхностей; кинематики движения; температуры в зоне трения и др.

Сравнительные испытания разных способов поверхностной обработки на экспериментальной установке, моделирующей условия работы разъемного резьбового соединения, показали, что наиболее эффективно предотвращают схватывание и повышают износостойкость оксидирование и обработка в расплаве йодистых солей калия и кадмия [3]. Натурные испытания резьбовых соединений с модифицированной поверхностью проводили на специальном стенде, принципиальная схема которого приведена на рисунке. Испытывали трубную резьбу на работоспособность при неоднократном свинчивании.

Муфтовый конец *1* трубы устанавливали в зажимном устройстве *2*, а ниппельный — во втулке с возможностью свободного вращения в режиме свинчивание/развинчивание резьбового соединения. Один конец троса прикрепляли к монтажному ключу *3*, другой через блок *4*, натяжное устройство *5* и динамометр *6* — к основанию стенда.

Момент свинчивания/развинчивания определяли как произведение силы натяжения троса (показание динамометра) на плечо этой силы.

Стенд прост в изготовлении, универсален и может быть использован для испытания трубных резьб на разных материалах при использовании различных смазочных материалов и уплотнений.

Работоспособность резьбового соединения при неоднократном свинчивании оценивали по разности моментов свинчивания и развинчивания: чем меньше разность (в идеале равна нулю), тем выше антифрикционные свойства сопрягаемых поверхностей и вероятность сохранения целостности резьбовых витков.

Момент свинчивания резьбового соединения определяется техническими условиями эксплуатации трубопровода: давлением жидкости; расположением трубопровода (горизонтальное, вертикальное или под углом к горизонту); растягивающими напряжениями от веса колонны при ее вертикальном или наклонном положении; гидравлическим трением транспортируемой по трубопроводу жидкости [4].

Коническую резьбу на ниппельном и муфтовом концах соединения "труба — полумуфта" нарезали с помощью специального устройства для токарного станка [5].

Ниже впервые приведены результаты стендовых испытаний, полученные при сравнении эффективности следующих трех способов поверхностной обработки резьб:

1) оксидирование на воздухе при температуре 1173 К (900 °С) в течение 1 ч [1];

2) выдержка в расплаве йодистых солей кадмия (55 %) и калия (45 %) при температуре 743 К (470 °С) в течение 1 ч [2];

3) комбинированный, включающий оксидирование при температуре 1173 К (900 °С) в течение 1 ч с последующей выдержкой в расплаве йодистых солей кадмия (55 %) и калия (45 %) при температуре 773 К (500 °С) в течение 1 ч [6].

Испытывали соединения труб с конической резьбой из сплава ВТ1-0 (технический титан) с проходным сечением $D_у$ = 60 мм.

Момент свинчивания резьбовых соединений для всех рассмотренных способов поверхностной обработки составлял 1,9 кН · м, что соответствует теоретическим расчетам [4].

При разовом свинчивании/развинчивании ни один из способов не имел преимуществ, но уже при трех циклах третий способ оказался в 1,5÷2 раза эффективнее второго и в 4÷5 раз — первого. Поэтому при большем числе циклов свинчивания/развинчивания рекомендуется третий способ поверхностной обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Вульф Б. К.** Термическая обработка титановых сплавов. М.: Металлургия, 1969. 339 с.

2. **Виноградов Ю. М., Довженко В. Д., Поликарпова Е. М.** Химико-термическая обработка титановых сплавов // Титан для народного хозяйства. М.: Наука, 1976. С. 262—267.

3. **Янко В. М., Веретенников Ю. Н., Лифшиц О. З.** Химико-термическая обработка сплава ВТ6 для повышения антифрикционных свойств // Металловедение и термическая обработка металлов. 1982. № 5. С. 52—54.

4. **Янко В. М.** Определение контактных напряжений в витках нагруженных резьбовых соединений насосно-компрессорных труб из титана // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2008. № 7. С. 12, 13.

5. **Янко В. М.** Изготовление конических резьб на трубопроводной арматуре и способы повышения герметичности резьбовых соединений // Вестник машиностроения. 2013. № 3. С. 41, 42.

6. **А. с. 1068539 СССР:** МКИ^5 С23С9/10. Способ химико-термической обработки деталей из титана.

УДК 004.4'236

О. А. БОЛЬШАКОВ (Институт конструкторско-технологической информатики РАН, Шнейдер Электрик), А. В. РЫБАКОВ, канд. техн. наук (МГТУ Станкин, Шнейдер Электрик), e-mail: OlegBolshakov@mail.ru

Автоматное моделирование подсистемы управления комплектной трансформаторной подстанцией собственных нужд и распределительным устройством

Предложен метод создания программного продукта на основе автоматных моделей. На конкретном примере показано автоматическое генерирование программного кода по автоматным моделям на языке структурного текста в соответствии с IEC 61131-3.

Ключевые слова: программное обеспечение, модель, разработка, алгоритм, автоматное программирование, программируемый логический контроллер.

The method of software development based on automatic models is suggested. The automatic generation of program code from automatic models on structured text language in conformity with IEC 61131-3 is shown on a particular example.

Keywords: software, model, development, algorithm, automatic programming, programmable logical controller.

Традиционного подхода к разработке программного обеспечения (ПО) на основе документации с использованием естественного языка уже недостаточно при больших и сложных проектах. В настоящее время при разработке ПО широко применяется теория моделирования, это объясняется рядом причин.

1. Программисту не просто автоматизировать сложные системы, если он имеет только поверхностное представление о предметной области. Разные исполнители одно и то же техническое задание могут понимать по-разному, так как текст может быть нечетким, неполным и даже вводить в заблуждение. Кроме того, при переходе с одного этапа на другой могут возникать препятствия для однозначного понимания сути вещей.

2. При проверке на соответствие программного продукта, что предопределено требованиями, возникает необходимость в коррекции, т. е. во внесении некоторых изменений. Этот процесс очень трудоемок и занимает много времени, а вероятность появления ошибки очень высока, так как программный код исправляется вручную и, как правило, не автором программного продукта. Причем, чем больше времени занимает выполнение проекта, тем выше затраты на исправление ошибок.

3. При составлении документации на программный продукт часто используют словесное описание поведения системы, блок-схемы алгоритмов управления, не привязанные к программному коду модели.

Информация дублируется в разных документах и нотациях, к тому же может быть противоречивой и нецелостной.

Цель данной работы — обоснование обеспечения качества, сокращения сроков и снижения стоимости разработки ПО на примере программного продукта для программируемых логических контроллеров (ПЛК) французской машиностроительной компании "Шнейдер Электрик" при использовании метода автоматного моделирования.

Разработка ПО на основе моделей

Решением поставленной задачи стал запущенный в 2001 г. группой Object Management Group (OMG) проект "Проектирование на базе моделей" [Model Driven Architecture (MDA)], который стал новым направлением в программной инженерии [1]. Основной идеей данного подхода является независимое рассмотрение моделей, создаваемых при проектировании системы, от деталей их реализации на конкретной программно-аппаратной базе. При этом модель неразрывно связывает все этапы разработки ПО — от сбора и анализа требований до приемочного тестирования.

В подходе MDA модели программных систем представляют с помощью унифицированного языка моделирования — Unified Modeling Language (UML) [2]. В течение ряда лет данный язык использовали только для представления моделей, однако в последнее время все большую популярность приобретает исполняемый UML [3]. Это связано с тем, что практическое использование UML в большинстве случаев ограничивается только моделированием статической части программ с помощью диаграмм, классов и генерацией, а по ним моделируется каркас кода программы. Моделирование же динамических аспектов программ затруднено в связи с отсутствием в стандарте формального и однозначного описания правил интерпретации (операционной семантики) поведенческих диаграмм [4].

В 1991 г. А. А. Шалыто предложил технологию автоматного программирования — Switch-технологию, которая представляет собой технологию разработки систем логического управления на базе конечных автоматов, охватывающую процессы: составления спецификации, проекти-

рования, реализации, отладки, верификации, документирования и сопровождения [5]. Switch-технология ориентирована на разработку ПО для микропроцессоров, микроконтроллеров и ПЛК. Она применяется в различных областях использования ПО, т. е. от клиент-серверных приложений, web-приложений, визуализаторов, мобильных систем и встроенных систем до систем высокой надежности (вооружение, аэрокосмическая индустрия). При этом ее автоматная парадигма универсальна. Автоматные модели можно реализовывать, используя разные парадигмы разработки ПО, например: процедурную, объектно-ориентированную, языки контроллеров (лестничные схемы, функциональные схемы).

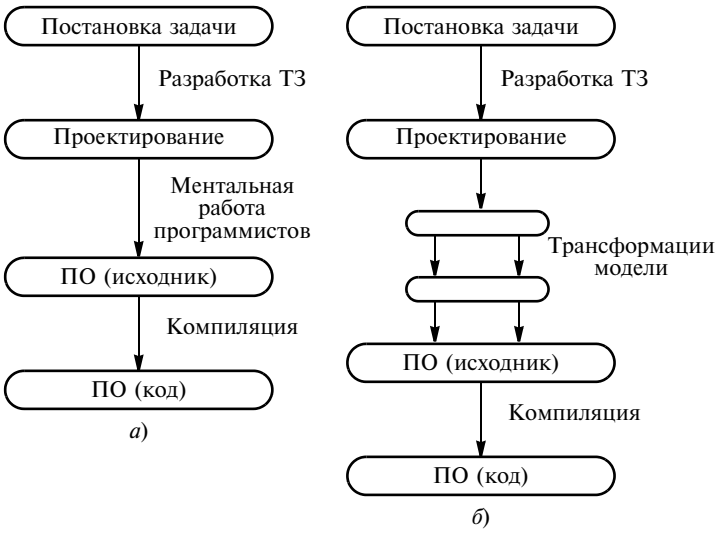


Рис. 1. Последовательности методов разработки ПО:
а — традиционного; *б* — на основе моделей

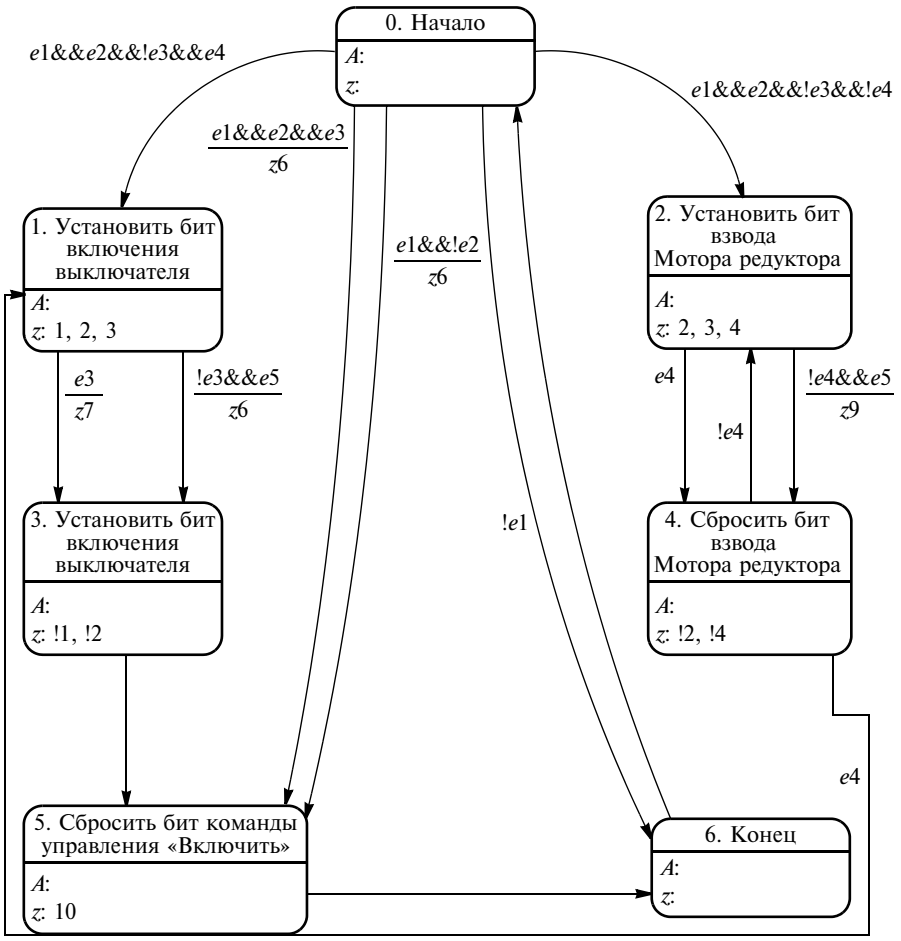


Рис. 2. Автоматная модель алгоритма включения автоматического выключателя QF

В качестве инструмента для моделирования интеллектуальных систем предлагается использовать технологию автоматного программирования. Автоматная парадигма не только позволяет строить модели предметной области на основе унифицированного языка моделирования UML [6], но и заставляет эти модели работать, т. е. существует математический аппарат и инструменты для автоматического преобразования диаграмм в программный код [7, 8].

На рис. 1, *а*, *б* показаны последовательности двух методов разработки ПО — традиционного и на основе моделей. При разработке ПО на основе моделей основная часть программирования интеллектуальных систем заключается в визуальной разработке логики управления и математических функций.

Использование автоматных моделей при разработке ПЛК

На рис. 2 представлена автоматная модель алгоритма включения автоматического выключателя QF. Наличие сложной логики управления обусловило необходимость разделения системы на компоненты. После автоматной декомпозиции алгоритм включения автоматического выключателя QF был выделен в отдельный автомат. После разбиения системы на компоненты (автоматы, выполняющие строго определенные функции) для них назначаются входные и выходные переменные, а также моделируется логика работы каждого.

По описанию строится набор управляющих состояний, например: "Установить бит включения выключателя", "Сбросить бит взвода мотора редуктора" и т. д. Управляющие состояния связывают переходами, включающими в себя условия и действия при переходе из одного состояния в другое.

Логика работы автомата строится на основе двоичной математики (операции с переменными типа boolean). Все переменные классифицируются на "События" (E) — сигналы от объектов управления (например, сигналы "Включен", "Выключен" от выключателя), "Входные воздействия" (X) — сигналы от устройства управления (например, кнопки "Включить выключатель", "Выключить выключатель на пульте оператора") и "Выходные воздействия" (Z) — управляющие сигналы для объектов управления на выходе автомата.

Для реализации предложенной методики не имелось специального инструментального средства, поэтому для автоматической генерации программного кода на язык структурного текста Structured text было разработано инструментальное средство MetaAuto [9], которое является единственным генератором автоматных моделей с открытым исходным кодом. Язык структурного текста выбран в связи с тем, что это единственный высокоуровневый язык в стандарте IEC 61131-3 [10]. Высокоуровневый язык очень удобен для построения математических выражений, что не предусмотрено в автоматном программировании. При построении графов переходов программируется только логика управления в чистом виде (операции с переменными типа boolean). При этом математические операции программируются вручную. Используя доработанный конвертер MetaAuto, программист ПЛК получает 80 % программного кода, сгенерированного автоматически, а 20 % дорабатывает вручную (рис. 3).

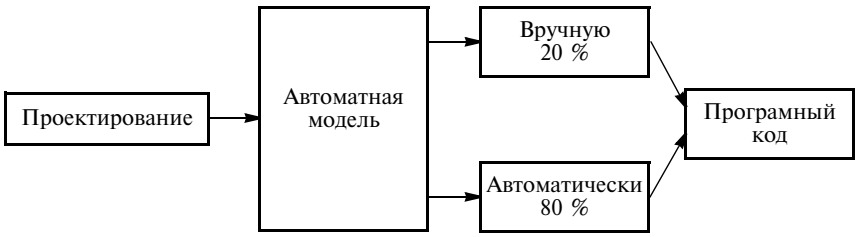


Рис. 3. Этапы разработки программной системы со сложным поведением

Однако и эти 20 % программного кода можно разбить на визуальное и ручное программирование. Для программирования сложных математических функций компания MathWorks разработала программный пакет Simulink PLC Coder [11], который генерирует аппаратно-независимый программный код на языке структурного текста Structured text по диаграммам State flow и встроенным функциям MATLAB. Таким образом, на долю привычного ручного программирования остается только 5÷10 %.

Ниже представлен фрагмент сгенерированного программного кода на языке структурного текста Structured text по графу переходов автомата "Включение автоматического выключателя QF":

```
(*--- Author: Bolshakov O. A. *)
(*--- Version : 1.0 *)
(*--- this file is machine generated ---*)
(**************************DESCRIPTION***************************)
(* This function block consists of:
(* Automat:A2 - Включение автоматического выключателя QF
(*****************************************************************)
CASE yA2 OF
0: (* Начало*)
IF (QF_CMD_ON=true AND QF_EN_ON=true AND (NOT (QF_ON=true)) AND QF_ST=true)
THEN
yA2 := 1;
END_IF;
IF (QF_CMD_ON=true AND QF_EN_ON=true AND (NOT (QF ON=true)) AND (NOT
(QF_ST=true)))
THEN
yA2 := 2;
END_IF;
IF (NOT (QF_CMD_ON=true))
THEN
yA2 := 6;
END_IF;
IF (QF_CMD_ON=true AND QF_EN_ON=true AND QF_ON=true)
THEN
(*Формирование сообщения оператору — «команда выполнена»*)
yA2 := 5;
END_IF;
IF (QF_CMD_ON=true AND (NOT (QF_EN_ON=true)))
THEN
(*Формирование сообщения оператору — «включение блокировано»*)
yA2 := 5;
END_IF;
(*==================================================
Paste your source code here
==================================================*)
1: (* Установить бит включения выключателя*)
QF_S_ON:=true;
T_imp_pusk:=true;
T_ust:=t#1s;
IF (QF_ON=true)
```

```
THEN
(*Формирование сообщения оператору — «команда выполнена»*)
yA2 := 3;
END_IF;
IF ((NOT (QF_ON=true)) AND T_imp_fin=true)
THEN
(*Формирование сообщения оператору — «команда не выполнена»*)
yA2 := 3;
END_IF;
(*==================================================
Paste your source code here
==================================================*)
2: (* Установить бит взвода Мотора редуктора*)
T_imp_pusk:=true;
T_ust:=t#10s;
QF_S_ST:=true;
IF ((NOT (QF_ST=true)) AND (T_imp_fin=true))
THEN
(*Формирование сообщения оператору — «автомат не взводится»*)
yA2 := 4;
END_IF;
IF (QF_ST=true)
THEN
yA2 := 4;
END_IF;
(*==================================================
Paste your source code here
================================================== *)
3: (* Сбросить бит включения выключателя*)
QF_S_ON:=false;
T_imp_pusk:=false;
IF TRUE
THEN
yA2 := 5;
END_IF;
(*==================================================
Paste your source code here
================================================== *)
4: (* Сбросить бит взвода Мотора редуктора *)
QF_S_ST:=false;
T_imp_pusk:=false;
IF (QF_ST=true)
THEN
yA2 := 1;
END_IF;
IF (NOT (QF_ST=true))
THEN
yA2 := 2;
END_IF;
(*==================================================
Paste your source code here
================================================== *)
5: (* Сбросить бит команды управления «Включить» *)
QF_CMD_ON:=false;
IF TRUE
THEN
yA2 := 6;
END_IF;
(*==================================================
Paste your source code here
==================================================*)
6: (* Конец *)
yA2 := 0;
        END_CASE;
```

При больших и сложных проектах связь между этапами разработки программного продукта теряется. Программист не видит задачу в целом, поэтому неоправданно много уходит времени на верификацию и документирование программного продукта. Эту задачу можно решить, используя технологию автоматного программирования.

Автоматные модели исключают проблему сложности предметной области, а также верификации и документирования, она фиксирует результат процесса проектирования. Модель, служащая единым языком для программиста и специалиста предметной области, обеспечивает точное соответствие программного продукта требованиям на этапе верификации. Моделями можно обмениваться с другими разработчиками, а также непосредственно использовать их в качестве входных данных для следующих этапов разработки системы — реализации и документирования. Таким образом, модель неразрывно связывает все этапы разработки ПО — от проектирования до документирования.

Данная методика повышает показатели качества программного продукта, так как тестируется не рукописный код, а модели. При этом значительно меньше требуется времени на верификацию и документирование. Эффективность автоматного подхода повышается с увеличением сложности логики управления, так как структура проекта строго определена. Кроме того, значительно снижается стоимость разработки ПО.

Таким образом, на основе предложенной методики построены автоматные модели, по которым был сгенерирован программный код (приложение). Полученный инструмент позволяет реализовывать автоматные модели любой сложности на оборудовании компании "Шнейдер Электрик", поддерживающем международный стандарт IEC 61131-3.

УДК 621.039.534

Ю. Н. ДРОЗДОВ, д-р техн. наук (ИМАШ РАН), А. В. БЕЗНОСОВ, канд. техн. наук, Т. А. БОКОВА, А. И. ШУМИЛКОВ, К. А. МАХОВ, А. С. ЧЕРНЫШ (Нижегородский ГТУ им. Р. Е. Алексеева), e-mail: beznosov@nntu.nnov.ru

Трение в среде высокотемпературного свинцового теплоносителя[1]

Представлены результаты экспериментальных исследований триботехнических характеристик пары трения в среде высокотемпературного свинцового теплоносителя при продольном возвратно-поступательном перемещении. Получены зависимости коэффициента трения в среде ТЖМТ от пути перемещения исследуемых образцов.

Ключевые слова: пара трения, тяжелый жидкометаллический теплоноситель, триботехническая характеристика, оксидное покрытие, коэффициент трения.

The results of experimental research of friction couple tribotechnical characteristics in high-temperature lead heat-transfer fluid environment at longitudinal reciprocal movement are presented. The dependencies of friction coefficient in medium of heavy liquid-metal coolant on motion path of the investigated specimens are obtained.

Keywords: friction couple, heavy liquid-metal coolant, tribotechnical characteristic, oxide coating, friction coefficient.

В России накоплен значительный опыт по созданию и эксплуатации транспортных реакторных установок со свинцово-висмутовым теплоносителем, которыми, например, оснащают атомные подводные лодки (АПЛ) (проекты 645, 705 и 705К), а также по исследованиям и созданию оборудования, где применяется свинцовый теплоноситель. Однако вопросам трибологии в элементах реакторных контуров в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей (ТЖМТ) не уделялось должного внимания. Имевшие место аварии и требования по обеспечению работоспособности таких реакторных энергоблоков как БРЕСТ И СВБР, которые отличаются от АПЛ режимом эксплуатации и работают десятилетиями на номинальной мощности, обусловили необходимость в исследованиях трибологических процессов в среде высокотемпературных свинцового и свинцово-висмутового теплоносителей реакторов на быстрых нейтронах.

Основные элементы рассматриваемых реакторных контуров с парами трения, работающими в среде расплавов свинца и эвтектики свинец-висмут:

главные циркуляционные насосы, в которых наиболее ответственными элементами являются подшипники скольжения, работающие в условиях высоких скоростей и нагрузок;

элементы системы управления и защиты реакторов;

стержни с нейтронопоглащающим веществом, находящимся в стальных оболочках, которые явля-

[1] Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение 14.B37.21.0322.

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 25)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Model** Driven Architecture — OMG. http://www.omg.org/mda.
2. **Универсальный** язык моделирования UML. Методология и нотация проектирования ПО. http://www.omg.org.
3. **Mellor S., Balcer M.** Executable UML: A Foundation for Model Driven Architecture. Addison Wesley, 2002. 258 p.
4. **http:**//is.ifmo.ru/science/MD-Mobile.pdf.
5. **Поликарпова Н. И., Шалыто А. А.** Автоматное программирование. СПб. Питер, 2011.
6. **Буч Г., Рамбо Г., Якобсон И.** UML. Руководство пользователя. М.: ДМК, 2000. 358 с.
7. **Головешин А.** Использование конвертора "Visio2Switch". http://is.ifmo.ru/progeny/visio2switch.
8. **Инструментальное** средство Unimod. http://is.ifmo.ru/unimod.
9. **Канжелев С. Ю., Шалыто А. А.** Преобразование графов переходов, представленных в формате MS Visio, в исходные коды программ для различных языков программирования (инструментальное средство "MetaAuto"). http://is.ifmo.ru/projects/metaauto.
10. **International** Electrotechnical Commission. http://www.iec.ch/index.htm.
11. **http:**//www.mathworks.com/products/sl-plc-coder.

ются поверхностью трения и взаимодействуют с поверхностью чехла стержней-поглотителей;

элементы системы перегрузки ядерного топлива;

система труб парогенераторов (теплообменные трубки) в зоне контакта с дистанционирующими решетками;

тепловыделяющие элементы в зоне контакта с дистанционирующими решетками.

Поверхности контура из конструкционных материалов, контактирующие с потоком тяжелого жидкометаллического теплоносителя, также можно считать трибологическими объектами.

Трибологические процессы в среде ТЖМТ имеют следующее особенности:

невозможность применения традиционных смазочных сред при контакте с расплавами жидких металлов;

высокая температура (400÷550 °С) контактирующих поверхностей;

малая вязкость жидкометаллических теплоносителей;

несмачиваемость теплоносителем рабочих поверхностей контура с оксидными покрытиями;

интенсивный отвод теплоты жидкометаллическими теплоносителями из зоны работы пары трения;

высокая концентрация в зоне контакта мелкодисперсных частиц и примесей (оксиды, соединения химических элементов, входящих в состав конструкционных материалов, продукты коррозионно-эрозионного изнашивания, загрязнения), образующих дисперсную систему с ярко выраженными поверхностными свойствами, которые отличаются от свойств основного объема теплоносителя;

большая плотность теплоносителя (на порядок больше плотности традиционных реакторных теплоносителей — натрия, воды);

значительные силы поверхностного натяжения.

Для обеспечения заданного ресурса оборудования с парами трения в среде ТЖМТ необходима информация об их триботехнических характеристиках. С этой целью в Нижегородском ГТУ им. Р. Е. Алексеева были проведены экспериментальные исследования по определению влияния пристенного слоя в системе "ТЖМТ — сталь с оксидным покрытием" на триботехнические характеристики пары трения при варьируемых параметрах высокотемпературного расплава свинца и эвтектики свинца-висмута.

При контакте металлических поверхностей с ТЖМТ в результате взаимодействия с кислородом, содержащимся в теплоносителе, образуются оксидные пленки. Образовавшиеся оксидные покрытия и пристенный слой предохраняют поверхности пары трения от схватывания, которое ведет к глубинному вырыванию материала и другим негативным эффектам. При этом оксиды теплоносителя, соединения компонентов сталей, пузырьки паров и газов, находящиеся в пристенном слое, создают эффект смазочного материала. При работе пары трения в этих условиях может происходить интенсивное изнашивание контактных поверхностей.

Исследовали влияние нагрузки при возвратно-поступательном горизонтальном перемещении образцов из конструкционных материалов на трибологические характеристики пары трения при постоянной термодинамической активности кислорода (содержании активного кислорода, способного вступать в реакции окисления) в расплаве свинца и свинца-висмута. Для этого было выполнено следующее:

разработаны схема, конструкции экспериментальных стендов, программа и методика испытаний;

созданы высокотемпературные стенды с ТЖМТ и экспериментальными участками;

отработаны основные узлы этих участков;

проведены экспериментальные исследования;

обработаны и проанализированы полученные результаты.

Эксперименты проводили на двух стендах: ТР-2010НГТУ и ТР-2012НГТУ.

Конструктивная схема стенда ТР-2010НГТУ приведена на рис. 1. Стенд предназначен для определения коэффициента $k_{тр}$ трения для поверхно-

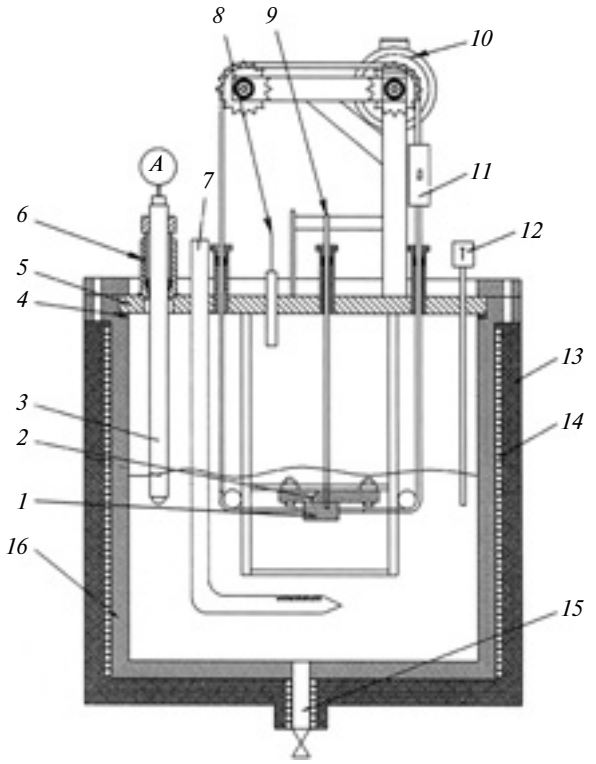


Рис. 1. Конструктивная схема стенда ТР-2010НГТУ:
1 и *2* — образцы (пара трения); *3* — датчик активности кислорода (ДАК); *4* — прокладка; *5* — крышка; *6* — уплотнение ДАК; *7* и *8* — трубки подвода и отвода газа; *9* — устройство нагружения; *10* — электродвигатель; *11* — тензодатчик динамометра; *12* — погружной термопреобразователь; *13* — теплоизоляция; *14* — спираль электронагревателя; *15* — дренаж; *16* — емкость

стей пар трения из стали в ТЖМТ при температуре $T_т$ = 500 °С, он состоит из емкости с ТЖМТ, системы управления оборудованием, системы электроснабжения, системы защитного газа.

Емкость *16* заполнена расплавом ТЖМТ. Нагревание осуществляется нихромовыми электроспиралями. Наружная поверхность емкости покрыта теплоизоляцией. На подвесной площадке находится образец *2*, а под ним располагается образец *1*, поджимаемый к образцу *2* выталкивающей силой Архимеда и усилием со стороны устройства, обеспечивающего необходимое механическое нагружение. Распределенную нагрузку на поверхности контакта пары трения варьировали от 50 до 250 кН/м^2 с помощью двух грузов массой 5 и 12,7 кг (первый обеспечивал нагрузку от 50 до 120 кН/м^2, второй — от 100 до 250 кН/м^2).

Образец *1* относительно образца *2* перемещали посредством системы блоков. Пара трения находилась в свинцово-висмутовом теплоносителе.

Испытания заключались в следующем:

в режиме холостого хода определяли силу, эквивалентную силе трения, вносимой конструктивными элементами стенда. Исследования проводили на воздухе и в среде свинцового теплоносителя при температуре $T_т$ = 500 °С, постоянной скорости перемещения v = 0,005 м/с и постоянной термодинамической активности кислорода a = 10;

определяли коэффициент $k_{тр}$ трения для образцов из стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки на воздухе (нормальная температура) при скорости перемещения образцов v = 0,005 м/с и распределенной нагрузке, которая изменялась от 50 до 250 кН/м^2;

определяли коэффициент $k_{тр}$ трения для образцов из стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки при температуре $T_т$ = 500 °С в среде свинцово-висмутового теплоносителя при скорости v = 0,005 м/с образца *1*, постоянной термодинамической активности кислорода и распределенной нагрузке, которая изменялась от 50 до 250 кН/м^2;

определяли коэффициент $k_{тр}$ трения для запассивированных в расплаве свинца образцов из стали 12Х18Н10Т при температуре $T_т$ = 500 °С в среде свинцово-висмутового теплоносителя при скорости перемещения образца v = 0,005 м/с, постоянной термодинамической активности кислорода и распределенной нагрузке, которая изменялась от 50 до 250 кН/м^2. Время пассивации образцов — 24 ч, температура расплава свинца $T_с$ = 450÷480 °С.

На рис. 2 представлены зависимости изменения коэффициента $k_{тр}$ трения от пути S перемещения образца *1* (см. рис. 1) при распределенных нагрузках, которые изменялись от 50 до 120 кН/м^2 (*а*) и от 100 до 250 кН/м^2 (*б*), для пассивированной и непассивированной поверхностей образцов в расплаве свинца, а также для непассивированной поверхности образца на воздухе.

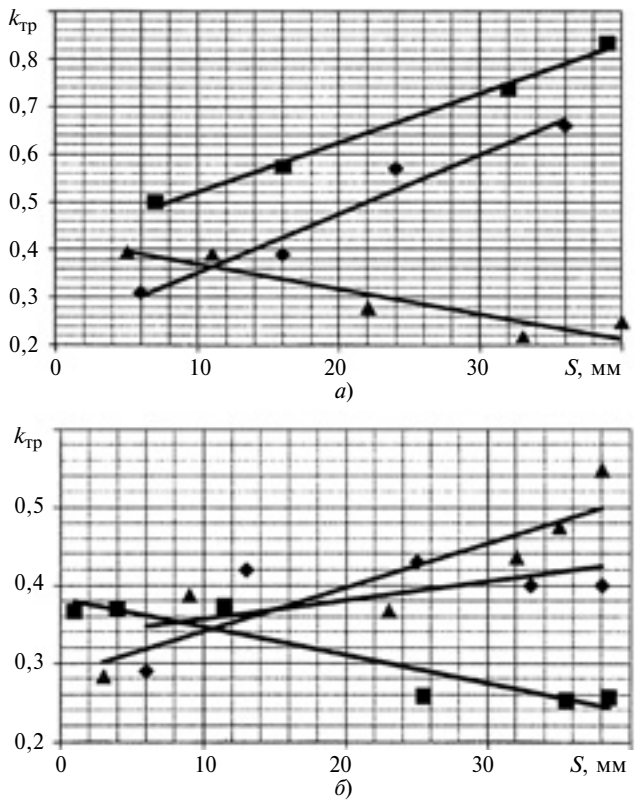


Рис. 2. Зависимости изменения коэффициента $k_{тр}$ трения от пути S перемещения образца *1* (см. рис. 1) при распределенных нагрузках от 50 до 120 кН/м^2 (*а*) и от 100 до 250 кН/м^2 (*б*) для пассивированной (▲) и непассивированной (■) поверхностей образцов в расплаве свинца, а также для непассивированной поверхности образца на воздухе (♦)

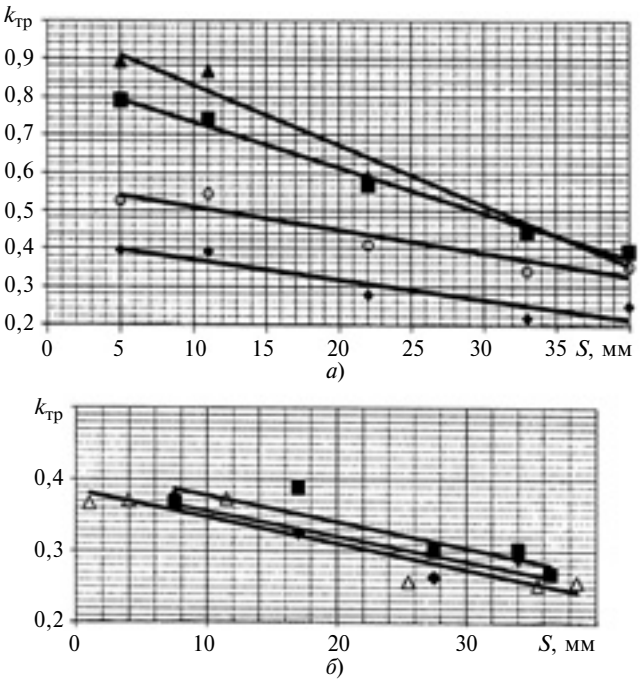


Рис. 3. Зависимости изменения коэффициента $k_{тр}$ трения от пути S перемещения для поверхностей пары трения с оксидными покрытиями в расплаве свинца при $T_т$ = 500 °С, a = 10 и распределенных нагрузках от 50 до 120 кН/м^2 (*а*) и от 100 до 250 кН/м^2 (*б*)

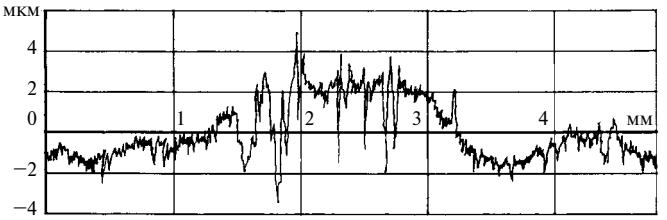


Рис. 4. Профилограмма одной из поверхностей пары трения с оксидным покрытием после эксперимента в расплаве свинца при $T_т$ = 500 °С, a = 10 и распределенной нагрузке, изменяющейся от 100 до 250 кН/м^2 (Ra = 0,56 мкм)

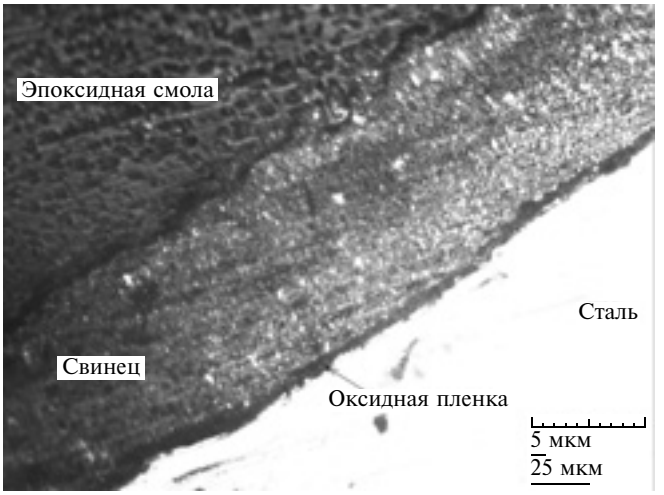


Рис. 5. Фотография шлифа образца с оксидным покрытием

На рис. 3 представлены зависимости изменения коэффициента $k_{тр}$ трения от пути S перемещения подвижного образца для поверхностей пары трения с оксидными покрытиями в расплаве свинца при температуре $T_т$ = 500 °С, термодинамической активности кислорода в свинце a = 10 и распределенных нагрузках, которые изменялись от 50 до 120 кН/м^2 (масса груза 5 кг) и от 100 до 250 кН/м^2 (масса груза 12,7 кг). Снижение значения $k_{тр}$ в процессе движения образца объясняется приработкой поверхностей пары трения.

После экспериментов были выполнены материаловедческие исследования образцов — получены профилограммы поверхностей пар трения (высота h неровностей по длине l исследуемого участка) из стали 12Х18Н10Т (рис. 4). На фотографии шлифа образца (рис. 5; Ra = 3,5 мкм) видны слой рыхлых отложений, пропитанных свинцом, и оксидная пленка.

Для определения трибологических показателей пары трения в среде высокотемпературного расплава свинца был создан стенд ТР-2012НГТУ (рис. 6).

Основные элементы стенда ТР-2012НГТУ: рабочая емкость, плавильный бак с ТЖМТ, система управления, система электроснабжения, система защитного газа.

Плавильный бак заполняют расплавом ТМЖТ и нагревают с помощью нихромовых электроспиралей. В рабочей емкости *19* находится образец *1* (пластина из стали 12Х18Н10Т) с контактной поверхностью в состоянии поставки. Образец *2* (металлический цилиндр) находится над ним и прижат к образцу *1* торцевой поверхностью (Ra = 3,2 мкм). Распределенная нагрузка на пару трения имела значения 60, 12 и 23 кН/м^2, скорость перемещения образцов составляла 0,01 м/с.

Возвратно-поступательное движение образца *2* относительно образца *1* осуществлялось с помощью двух двигателей. Исследования проводили на

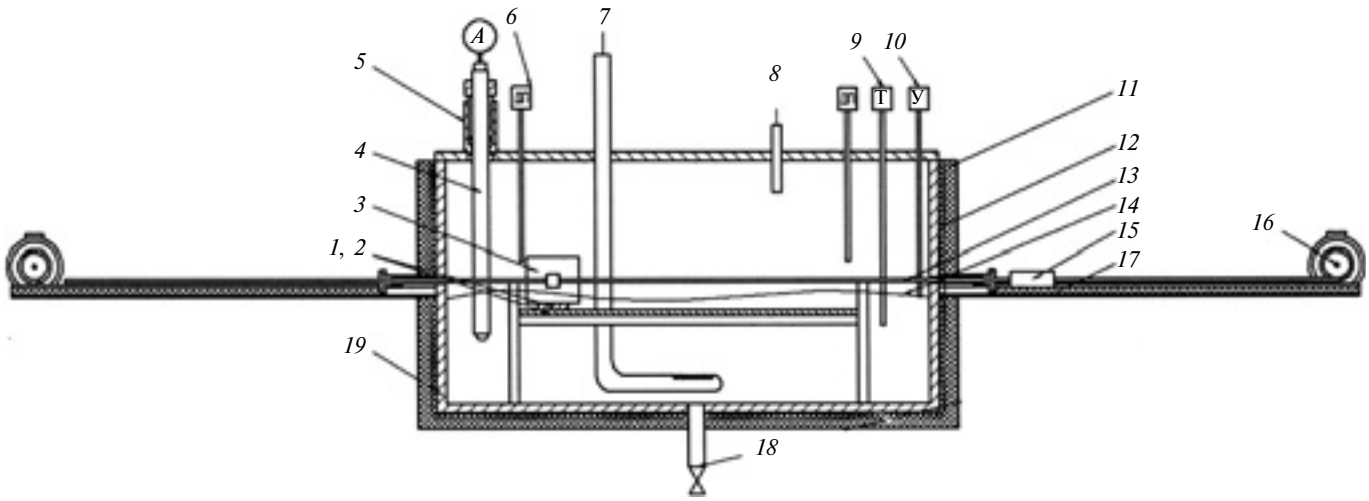


Рис. 6. Экспериментальный участок стенда ТР-2012НГТУ:
1 и *2* — образцы (пара трения); *3* — устройство нагружения; *4* — ДАК; *5* — узел уплотнения ДАК; *6* — электроконтактный датчик положения пары трения; *7* и *8* — трубки подвода и отвода газа; *9* — погружной термопреобразователь; *10* — электроконтактный датчик уровня расплава ТЖМТ; *11* — теплоизоляция; *12* — спираль электронагревателя; *13* — стержень для перемещения пары трения; *14* — уровень расплава свинца; *15* — тензометрический датчик динамометра ДОУ-3И; *16* — двигатель; *17* — направляющие; *18* — дренаж в плавильный бак; *19* — рабочая емкость

воздухе и в среде свинцового теплоносителя при температуре $T_т$ = 500 °С и постоянной термодинамической активности кислорода, скорость перемещения образцов υ = 0,005 м/с.

Эксперимент заключался в следующем:

в режиме холостого хода определяли силу тяги, эквивалентную силе трения, вносимой конструктивными элементами стенда; исследования проводили без образцов при скорости перемещения тросов 0,01 м/с;

в режиме холостого хода определяли силу, эквивалентную силе трения, вносимой конструктивными элементами стенда. Исследования проводили на воздухе и в среде свинцового теплоносителя при температуре $T_т$ = 500 °С, скорости перемещения тросов 0,005 м/с и a = 10;

определяли коэффициент трения для образцов из стали 12Х18Н10Т в состоянии поставки в среде свинцового теплоносителя при температуре $T_т$ = 500 °С, скорости перемещения образцов υ = 0,01 м/с, постоянной термодинамической активности кислорода и распределенных нагрузках 60, 12 и 23 кН/м^2;

определяли коэффициент трения запассивированных в расплаве свинца образцов из стали 12Х18Н10Т при температуре $T_т$ = 500 °С в среде свинцового (или свинцововисмутового) теплоносителя при скорости перемещения образцов υ = 0,01 м/с, a = 10 и распределенных нагрузках 60, 12 и 23 кН/м^2. Время пассивации образцов — 24 ч, условия пассивации: температура расплава свинца 480 °С, термодинамическая активность кислорода a = 10.

Результаты экспериментов, полученные для пассивированной в расплаве свинца и непассивированной поверхностей при распределенных нагрузках на пару трения p = 60, 12, 23 кН/м^2 показаны соответственно на рис. 7, *а—в*.

Получены профилограммы поверхностей пар трения из стали 12Х18Н10Т без покрытия (рис. 8, *а*) и с оксидным покрытием (рис. 8, *б*) после эксперимента в расплаве свинца при температуре $T_т$ = 500 °С и распределенной нагрузке p = 12 кН/м^2. На фотографии шлифа образца (рис. 9; Ra = 3,5 мкм) виден слой сформированной оксидной пленки.

Анализ полученных результатов показал, что сформированные оксидные покрытия на контактных поверхностях пары трения значительно снижают коэффициент трения. Так, при скорости перемещения υ = 0,005 м/с одного образца пары трения относительно другого у образцов с оксидными покрытиями коэффициент трения снижается с 0,8 до 0,3, а у образцов без покрытия увеличивается с 0,3 до 0,8; при p = 60 кН/м^2 и υ = 0,01 м/с у образцов с покрытием коэффициент трения изменяется незначительно с 0,12 до 0,10, а у образцов без покрытия снижается с 0,45 до 0,32; при p = 12 кН/м^2 и υ = 0,01 м/с коэффициент трения образцов с покрытием остается неизменным ($k_{тр}$ = 0,1), а у образцов без покрытия повышается с 0,32 до 0,38; при p = 23 кН/м и υ = 0,01 м/с соответственно $k_{тр}$ = 0,08 и наблюдается снижение $k_{тр}$ с 0,38 до 0,36.

Анализ профилограмм поверхностей образцов из стали 12Х18Н10Т со сформированными покрытиями и без них после испытаний в свинцовом теплоносителе показал следующее: при p = 100÷250 кН/м^2 параметр Ra шероховатости

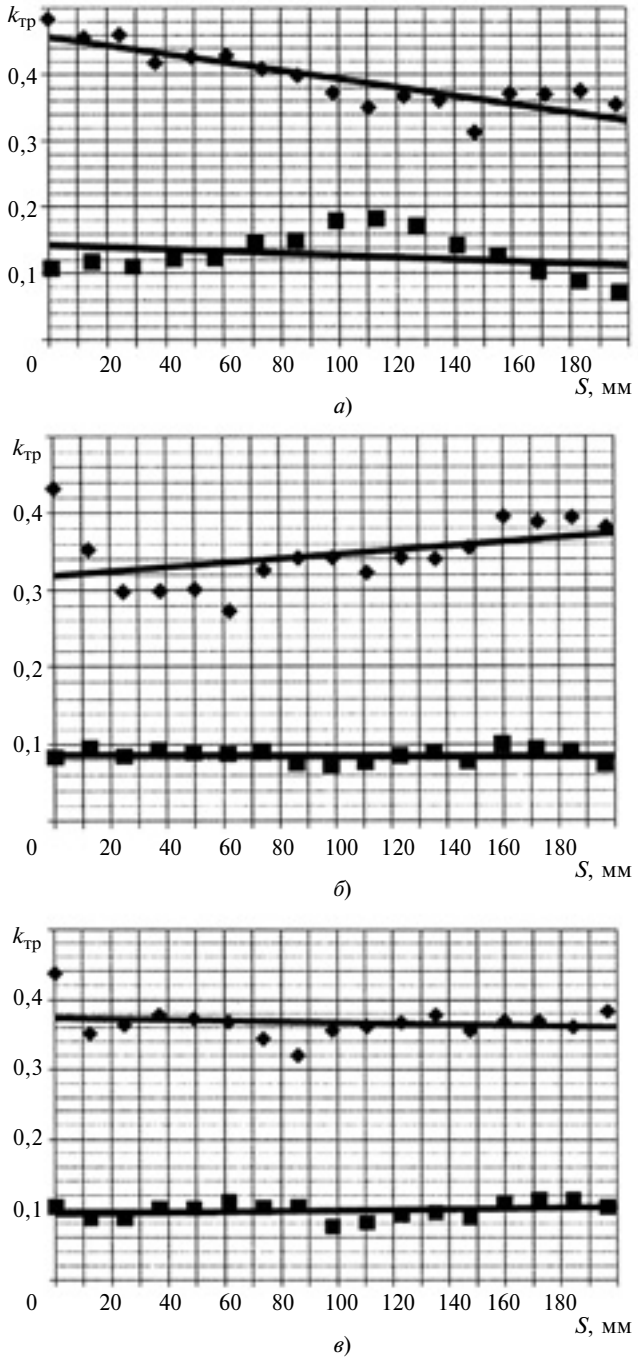


Рис. 7. Зависимости изменения коэффициента $k_{тр}$ трения от пути S перемещения подвижного образца для пассивированной в расплаве свинца (♦) и непассивированной (■) поверхностей пары трения при распределенных нагрузках p = 60 (*а*), 12 (*б*) и 23 кН/м^2 (*в*)

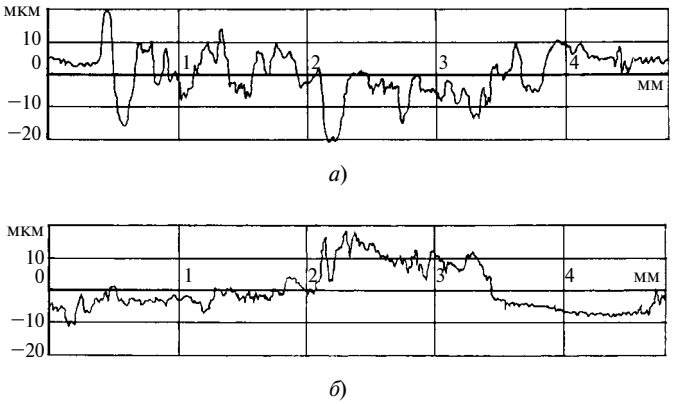


Рис. 8. Профилограммы поверхностей пар трения из стали 12Х18Н10Т без оксидного покрытия (*а*) и с оксидным покрытием (*б*) после эксперимента в расплаве свинца при $T_т$ = 500 °С и p = 12 кН/м^2

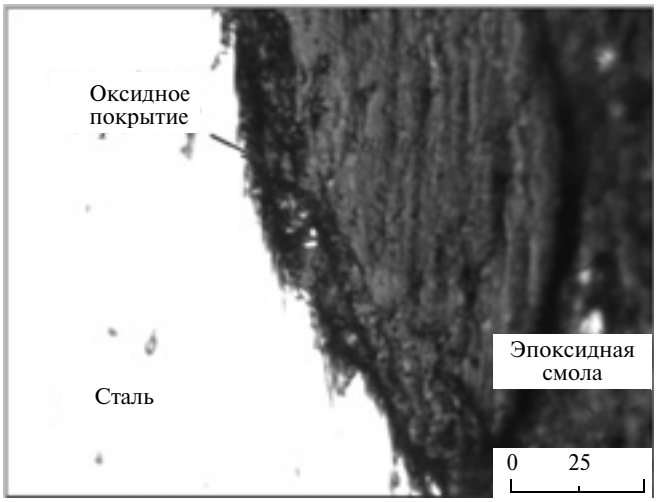


Рис. 9. Фотография шлифа образца с оксидным покрытием

поверхности образца с оксидным покрытием составил 0,56 мкм (до эксперимента он составлял 0,25 мкм), а у образца без покрытия Ra = 0,71 мкм; при p = 12 кН/м^2 соответственно Ra = 1,8 мкм и Ra = 3,5 мкм.

Сравнение фотографий шлифов контактных поверхностей образцов из стали 12Х18Н10Т со сформированными покрытиями и без них (до и после испытаний) в свинцовом теплоносителе при указанных выше условиях показало следующее.

У образцов с оксидными покрытиями поверхность после эксперимента имела незначительные изменения — вершины и впадины профиля не превышали 10 мкм, у образцов без оксидного покрытия имелись вершины и впадины профиля до 20 мкм.

Установлено, что в среде тяжелых жидкометаллических теплоносителей реакторных установок на поверхностях формируются оксидные покрытия, наблюдается интенсивный теплоотвод в зоне контакта оксидированных поверхностей, в среде высокотемпературных свинцового и свинцововисмутового теплоносителей существенно уменьшается коэффициент трения контактирующих поверхностей пары трения, что способствует повышению их ресурса.

УДК 621.892

Е. Б. СЕДАКОВА, Ю. П. КОЗЫРЕВ, кандидаты технических наук (Институт проблем машиноведения РАН, г. Санкт-Петербург), e-mail: elenasedakova2006@yandex.ru

Прогнозирование триботехнических свойств полимерных композитов на основе физической модели изнашивания

Рассмотрена возможность получения физической модели износа по эмпирическому закону изнашивания для разработки полимерных композиционных материалов с прогнозируемой износостойкостью. Приведены формулы для расчета их интенсивности изнашивания с учетом содержания дисперсного наполнителя и контактного давления.

Ключевые слова: износостойкость, объемная концентрация, композит, трение, полимер.

The possibility of obtaining of physical wear model, basing on empirical wear law for development of polymer composite materials with predictable wear resistance is considered. The formulas for calculation of their wear intensity taking into account the amount of disperse filler and contact pressure are presented.

Keywords: wear resistance, concentration by volume, composite, friction, polymer.

При создании новых полимерных композиционных материалов триботехнического назначения желательно уже на начальной стадии разработки прогнозировать их износостойкость. Это можно сделать на основании эмпирического закона изнашивания (ЭЗИ) [1], который выражается коэффициентом износа

$$K = apv\mathrm{e}^{-bpv} + c(\mathrm{e}^{dpv} - 1), \qquad (1)$$

где pv — нагрузка (p — контактное давление, v — скорость скольжения); a, b, c, d — размерные коэффициенты, характерные для исследуемого материала.

В работе [1] показано, что ЭЗИ справедлив в широком диапазоне нагрузок и применим для определения K при любом pv в заданном диапазоне.

Первое слагаемое выражения (1) описывает механохимическую, второе — механическую составляющие изнашивания. В технических исследованиях износостойкость материалов часто оценивают по величине I_h интенсивности линейного изнашивания. Используя полученные размерные коэффициенты и учитывая, что $I_h = Kp$, из выражения (1) определим

$$I_h = ap^2 v e^{-bpv} + cp(e^{dpv} - 1). \qquad (2)$$

Однако выражение (2) можно использовать для оценки I_h лишь готового материала. Для прогнозирования свойств разрабатываемых композитов необходимо иметь обобщенное выражение, учитывающее как особенности изнашивания составляющих композита, так и их взаимное влияние. В работах [2, 3] отмечается, что поверхность трибоконтакта композита состоит из чередования материалов матрицы и наполнителя. Это показал анализ поверхности трения методом сканирующей электронной микроскопии. При действии внешней сжимающей нагрузки контактное давление распределяется между матрицей и наполнителем, а износостойкость композита зависит от механических и триботехнических свойств этих составляющих. Чтобы найти ЭЗИ композита, недостаточно знать размерные коэффициенты, полученные отдельно для полимерной матрицы и наполнителя, так как влияние составляющих композита на его износостойкость не подчиняется правилу аддитивности. Это подтверждается и существенным различием коэффициентов ЭЗИ, ответственных как за механизм изнашивания, так и за степень влияния температуры на физико-механические характеристики. Требуется найти такой ЭЗИ, коэффициенты которого учитывали бы распределение общей нагрузки отдельно по поверхностям трения матрицы и наполнителя. Внешнюю нагрузку, приходящуюся на контактную поверхность матрицы, обозначим β, тогда внешняя нагрузка, приходящаяся на контактную поверхность наполнителя, будет (1 − β). Обозначим в уравнении (2) размерные коэффициенты, характеризующие I_h матрицы, как a_1, b_1, c_1, d_1, а коэффициенты, характеризующие I_h наполнителя, как a_2, b_2, c_2, d_2. При выведении общего ЭЗИ для наполнителя и матрицы необходимо учесть полученные размерные коэффициенты. В работе [1] отмечалось, что коэффициент b в показателе степени первого слагаемого ЭЗИ связан с образованием вторичных структур. В композите не могут одновременно протекать два диффузионных процесса, способствующих формированию вторичных структур. Представляется, что в реальном композите преобладает процесс, связанный с физико-механическими свойствами матрицы. На это указывает и то, что $b_1 \gg b_2$. Тогда следует принять b_1 в качестве коэффициента в показателе степени экспоненты в первом слагаемом ЭЗИ композита в целом. Влияние других коэффициентов на коэффициенты ЭЗИ композита будет определяться величиной β.

Учитывая изложенное, уравнение (2) можно записать в виде:

$$\begin{aligned} I_h = {} & \beta^2 p^2 v a_1 e^{-b_1 pv} + \beta p c_1 (e^{d_1 pv} - 1) + \\ & + (1-\beta)^2 p^2 v a_2 e^{-b_2 pv} + (1-\beta) p c_2 (e^{d_2 pv} - 1) = \\ & = p^2 v (\beta^2 a_1 + (1-\beta)^2 a_2) e^{-b_1 pv} + \\ & + p(\beta c_1 + (1-\beta) c_2)(e^{(\beta d_1 + (1-\beta) d_2) pv} - 1). \end{aligned} \qquad (3)$$

Обозначив в уравнении (3): $a_э = \beta^2 a_1 + (1-\beta)^2 a_2$; $b_э = b_1$; $c_э = \beta c_1 + (1-\beta) c_2$; $d_э = \beta d_1 + (1-\beta) d_2$, получим:

$$I_h = a_э p^2 v e^{-b_э pv} + c_э p(e^{d_э pv} - 1). \qquad (4)$$

В уравнение (4) входит величина β, для определения которой в работах [4, 5] получены выражения с учетом двух разных широко применяемых технологий изготовления композиционных материалов. Для композитов, полученных перемешиванием крупных частиц полимера с мелкими частицами наполнителя, величину β можно рассчитать по формуле

$$\beta = \frac{(1 - 0{,}7\varphi_f)}{(1 - 0{,}7\varphi_f) + 0{,}7\varphi_f (E_f / E_m)}, \qquad (5)$$

где φ_f — объемная концентрация наполнителя; E_m — модуль упругости матрицы; E_f — сопротивление наполнителя деформированию.

Выражение (5) получено для композитов с пространственной структурой наполнителя [4] исходя из равенства деформаций при сжатии матрицы и наполнителя.

Для композитов, полученных введением частиц наполнителя в расплав полимера, величину β можно рассчитать по формуле

$$\beta = \frac{(1 - \varphi_f^{2/3})}{(1 - \varphi_f^{2/3}) + \left(\frac{2}{Q} l_m e^{r_f / k_c} + 1\right) \varphi_f^{2/3}}, \qquad (6)$$

где r_f — линейный размер одной частицы наполнителя; l_m — относительная длина агрегатов частиц наполнителя; Q — коэффициент усиления композита, для рассматриваемого случая $Q = 3/8$ [6]; k_c — постоянная размера наполнителя.

Выражение (6) получено для композитов, наполнитель в которых имеет случайную структуру с

возможностью образования агрегатов частиц, нормальных к поверхности трения [5]. При сжатии на боковых поверхностях агрегатов частиц дисперсного наполнителя возникают дополнительные напряжения сдвига, вызванные разностью деформаций материалов матрицы и наполнителя. Выбор величины k_c в равенстве (6) определяется тем, что наполнитель с разной дисперсностью имеет разную суммарную площадь поверхности при одной и той же концентрации. Так, суммарная площадь поверхности наноразмерного наполнителя при заданной концентрации будет существенно больше аналогичной площади наполнителя микронных размеров. При создании композита полимер адсорбируется на поверхности наполнителя, вследствие чего образуется слой с повышенными механическими свойствами [7, 8]. По-видимому, при действии сил сжатия этот слой и передает сдвиговые напряжения наполнителю. Следовательно, чем больше суммарная поверхность наполнителя, тем эффективнее передаются напряжения. Величину k_c найдем по зависимости суммарной площади частиц наполнителя от их линейного размера с последующей ее аппроксимацией экспоненциальной кривой. Таким образом, при введении наноразмерного наполнителя получим k_c = 0,5 мкм, а при введении наполнителя микронных размеров — k_c = 3 мкм.

В результате при принятых допущениях получили физическую модель изнашивания модельных композитов, т. е. математическое выражение (4) ЭЗИ с эквивалентными коэффициентами, которое позволяет уже на стадии разработки по небольшому числу опытных образцов подобрать материалы с оптимальной износостойкостью для заданных условий нагружения.

Рассмотрим применимость выражения (4) для оценки износостойкости двух групп полимерных композитов — с пространственным и случайным распределением наполнителя: первая — композиты на основе политетрофторэтилена (ПТФЭ); вторая — композиты на основе полиамида. В качестве наполнителей использовали мелкодисперсные фракции углеродных графитированных материалов, пропитанных сплавами антифрикционных металлов: АГ-1500 СО5 (ТУ 48-4802-3—2001) и АГ-600 СО5 (ТУ 48-20-3—77). Средний размер частиц наполнителя обеих групп композитов — 5÷7 мкм, соответствует дисперсности промышленного наполнителя Ф4К15М5 (ТУ 6-05-1412—76).

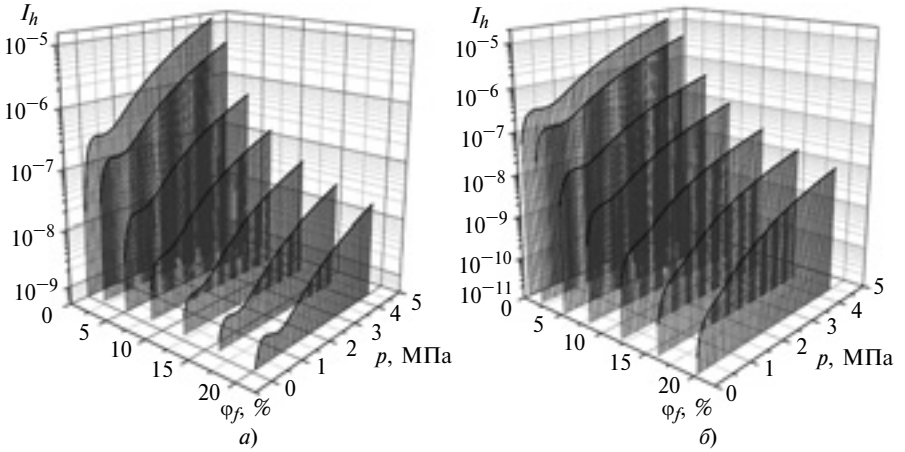


Рис. 1. Зависимости I_h от p и φ_f для модельных композитов ПТФЭ + АГ-600 СО5 (*а*) и ПТФЭ + АГ-1500 СО5 (*б*)

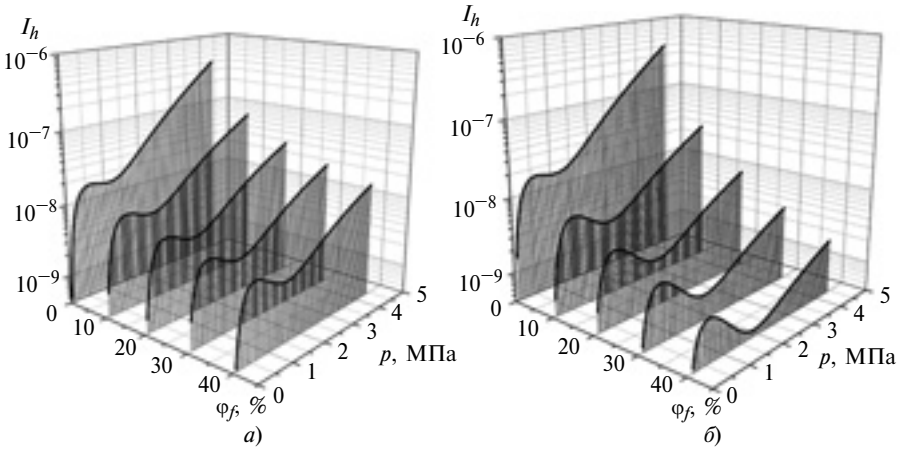


Рис. 2. Зависимости I_h от p и φ_f для модельных композитов ПА6 + АГ-600 СО5 (*а*) и ПА6 + АГ-1500 СО5 (*б*)

С помощью 3D графиков можно проследить, как изменяется износостойкость модельных композитов при увеличении концентрации φ_f в исследуемом диапазоне контактных давлений p (рис. 1 и 2). Все зависимости получены на основании выражения (4) ЭЗИ: при $\varphi_f = 0$ ($\beta = 1$) получим зависимость I_h от p для чистого полимера; при увеличении φ_f значение I_h существенно снижается. Зависимости на рис. 1 построены до φ_f = 20 %, соответствующей концентрации промышленного Ф4К15М5.

На рис 1, *а* приведены зависимости I_h от p и φ_f для модельного композита ПТФЭ + + АГ-600 СО5. Отметим, что при повышении p для всех заданных значений φ_f имеется выраженная область стабилиза-

ции величины I_h. Для модельного композита ПТФЭ + АГ-1500 СО5 (рис. 1, *б*) при увеличении φ_f стабилизация зависимости I_h от p, хорошо видимая при небольших концентрациях, постепенно уменьшается и при $\varphi_f = 20$ % становится достаточно ровной. При увеличении φ_f (см. рис. 1, *б*) наблюдается повышение износостойкости, но эта зависимость менее выражена, чем зависимость на рис. 1, *а*.

На рис. 2 приведены зависимости изменения I_h от p и φ_f для модельных композитов на основе полиамидов ПА6 + АГ-600 СО5 и ПА6 + АГ-1500 СО5. Зависимости построены до концентрации $\varphi_f = 40$ %, которая часто используется при введении наполнителя микронных размеров в расплав полимера. Они имеют выраженные участки стабилизации величины I_h при увеличении давления p. Зависимости на рис. 2, *а* сходны с зависимостями на рис. 2, *б*, однако на рис. 2, *б* более заметно влияние φ_f на величину I_h модельного композита. Например, при $\varphi_f = 40$ % и $p = 2$ МПа величина I_h композита ПА6 + АГ-1500 СО5 более, чем на порядок, меньше величины I_h модельного композита ПА6 + АГ-600 СО5.

Сравнение зависимостей на рис. 1 и 2 показывает, что введение в ПТФЭ и полиамид одного и того же наполнителя повышает износостойкость композита, однако динамика снижения величины I_h для этих матриц различна. При введении наполнителя в ПТФЭ-матрицу износостойкость композита может повыситься приблизительно в несколько сотен раз, а при введении такого же наполнителя в полиамид — не более, чем на порядок. Это подтверждают экспериментальные исследования композитов на изнашивание. Разная динамика снижения I_h наблюдается и при использовании для одной и той же матрицы наполнителей из материалов одного типа с близкими физико-механическими свойствами.

Таким образом, предложенную физическую модель (4) изнашивания композитов можно использовать для прогнозирования их износостойкости на стадии разработки с учетом условий нагружения, концентрации наполнителя и технологических особенностей его введения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Козырев Ю. П., Седакова Е. Б.** Многофакторный анализ механизмов износа политетрафторэтилена и его композита с использованием эмпирического закона // Вестник машиностроения. 2009. № 7. С. 43—47.
2. **The friction** and wear characteristics of nanometer ZnO filled polytetrafluoroethylene / F. Li, K. A. Hu, J. L. Li, B. Y. Zhao // Wear. 2001. V. 249. N 10, 11. P. 877—882.
3. **The friction** and wear properties of polytetrafluoroethylene filled with ultrafine diamond / S-Q. Lai, Li Yue, T-S. Li, Z-M. Hu // Wear. 2006. V. 260. P. 462—468.
4. **Козырев Ю. П., Седакова Е. Б.** Влияние особенностей структуры композиционных материалов на основе политетрафторэтилена на снижение нагруженности матрицы // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 2. С. 40—45.
5. **Козырев Ю. П., Седакова Е. Б.** Влияние процесса направленной агрегации частиц на характеристики полимерных антифрикционных нанокомпозитов // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2010. № 4. С. 86—91.
6. **Принципы** создания композиционных полимерных материалов / А. А. Берлин, С. А. Вольфсон, В. Г. Ошмян, Н. С. Ениколопов. М.: Химия, 1990. 240 с.
7. **Охлопкова А. А., Петрова П. Н., Гоголева О. В.** Исследование триботехнических характеристик нанокомпозитов на основе смесей полимеров // Трение и износ. 2009. Т. 30. № 5. С. 500—505.
8. **Сравнительный** анализ влияния нано- и микронаполнителей окисленного Al на фрикционно-механические свойства СВМПЭ / С. В. Панин, Л. А. Корниенко, С. Ваннарси и др. // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 5. С. 492—499.

ВНИМАНИЮ ПОДПИСЧИКОВ ЖУРНАЛА "ВЕСТНИК МАШИНОСТРОЕНИЯ"

Подписка на журнал принимается по каталогам:

"Роспечать" — индекс **70120**;
"Пресса России" — индекс **27841**;
"Почта России" — индекс **60264**.

УДК 621.941.025

Н. С. ИНДАКОВ, канд. техн. наук, А. С. БИНЧУРОВ
(Сибирский федеральный университет, г. Красноярск),
e-mail: mexanixs@mail.ru

Особенности геометрии многогранных резцов для ротационного точения[1]

Рассматриваются изменения геометрических параметров ротационного резца в процессе резания. Даются общие рекомендации по назначению и расчету кинематических углов резца.

Ключевые слова: передний и задний углы, многогранный ротационный резец, лезвие, режущая кромка.

The changes in geometrical parameters of rotary cutter in cutting process are considered. The general recommendations on setting and calculation of cutter working angle are given.

Keywords: face and relief angles, multisurface rotary cutter, blade, cutting edge.

Ротационное точение многогранными резцами — новый и весьма перспективный для определенных условий обработки метод [1], однако требующий детальных исследований. Для анализа режущих свойств инструмента необходимо рассмотреть его геометрические параметры в процессе обработки [2]. Для этого предложены системы координат и схемы измерения углов ротационных инструментов, позволяющие определить угловые кинематические параметры как результат относительного движения резца и заготовки в каждый момент времени в рассматриваемой точке режущей кромки [3, 4].

В предлагаемом методе ротационный резец представляет собой многогранное тело чашечной формы с посадочным отверстием и режущей частью, состоящей из N режущих лезвий. Каждое лезвие имеет заднюю и переднюю поверхности, которые образуют прямолинейную режущую кромку [5]. Режущие кромки всех лезвий, расположенные в плоскости, перпендикулярной к оси вращения ротационного резца, образуют режущий многоугольник [6]. Режущая кромка при взаимодействии с заготовкой имеет постоянно изменяющийся угол λ наклона (рис. 1), который определяется по формуле: $\lambda = 90° - \mu \pm \psi$; где μ и ψ — углы наклона максимального радиус-вектора контура режущей кромки соответственно при симметричном положении лезвия относительно оси центров и относительно плоскости оси центров; знак "+" — при резании ниже плоскости оси центров, знак "–" — выше.

Угол μ наклона рассчитывается по формуле $\sin\mu = l/2\rho_{max}$, где l — длина режущего лезвия, мм; ρ_{max} — максимальный радиус-вектор контура режущей кромки, мм.

Угол ψ наклона рассчитывается по формуле $\sin\psi = S_{кр}/\rho_{max}$, где $S_{кр}$ — круговая подача заготовки, мм/мин.

Кинематический угол между плоскостью, перпендикулярной вектору $\bar{v}_e$ скорости результирующего движения резания, и режущей кромкой, находящейся в зоне резания, составит $\lambda_к = \eta_M$, где η_M — угол подъема винтовой траектории результирующего движения в точке M, который определяется по формуле $\cos\eta_M = \dfrac{v_р \cos\psi S_{кр}}{|\bar{v}_e| 1000}$, где $v_р$ — скорость резания, м/мин; $|\bar{v}_e| = \sqrt{\left(\dfrac{-S_{пр} n_з}{1000} - v_р \sin\psi\right)^2 + \left(v_р \cos\psi + \dfrac{S_{кр}}{1000}\right)^2}$ — скорость результирующего движения резания. Здесь $S_{пр}$ — продольная подача резца на оборот обрабатываемого вала, мм/об; $n_з$ — частота вращения заготовки, мин$^{-1}$. Кинематический угол $\lambda_к$ — максимален на вершине резца при врезании в заготовку ниже оси центров и минимален при выходе из зоны резания выше оси центров, что является следствием разнонаправленности вектора скорости $\bar{v}_р$ главного движения (см. рис. 1). На рис. 1 также показаны $\bar{v}_з \div \bar{v}_s$ — векторы скоростей соответственно круговой подачи заготовки и продольной подачи инструмента, м/мин.

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, государственный контракт № 14.513.11.0039.

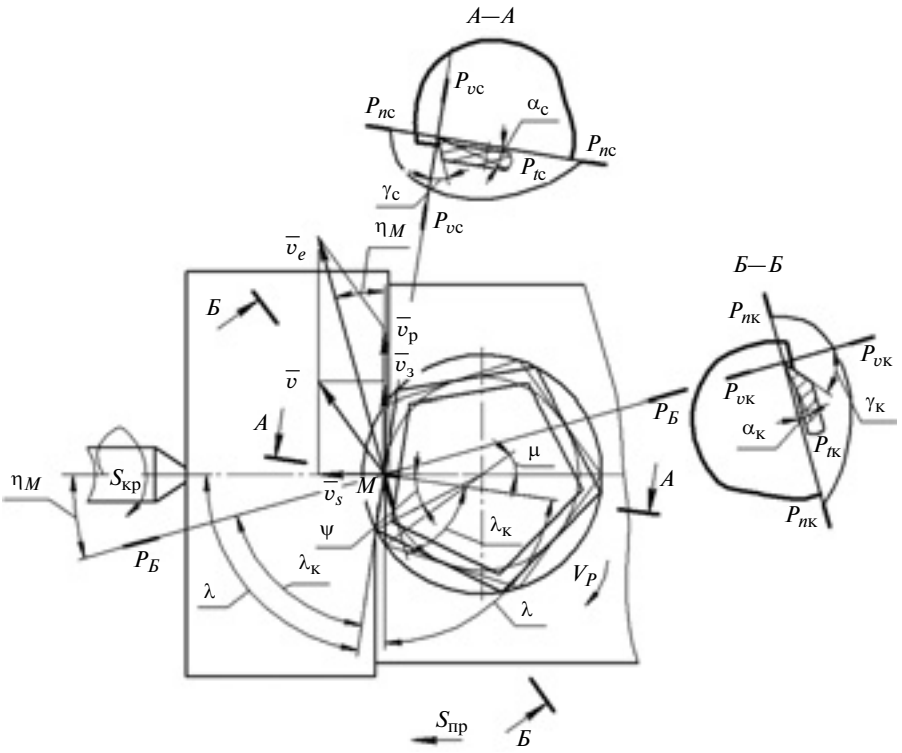


Рис. 1. Статическая и кинематическая системы координат при ротационном точении многогранными резцами

В инструментальной системе координат (рис. 2) измеряют передний и задний инструментальные углы, которые обеспечиваются при изготовлении и заточке инструмента.

Исходя из способа установки ротационного резца относительно заготовки, для исключения затирания по задней поверхности необходимо соблюдать условие: $\alpha \geqslant \alpha_{и\,min}$ где α — фактический задний угол заточки резца; $\alpha_{и\,min}$ — минимально необходимый задний угол.

При ротационном точении валов по принятой схеме, когда ось инструмента располагается перпендикулярно к оси заготовки, минимальный задний угол $\alpha_{и\,min}$ (рис. 3) [7] резца определяется по формуле $\mathrm{tg}\alpha_{и\,min} = t_{ст}/\rho_{max}$, где $t_{ст}$ — глубина резания на линии оси центров, мм.

Статический задний угол α_c измеряется в статической главной секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и статической плоскостью P_{nc} резания.

Кинематический задний угол $\alpha_к$ измеряется в кинематической главной секущей плоскости между задней поверхностью лезвия и кинематической плоскостью $P_{nк}$ резания. Для его нахождения необходимы дополнительные построения (рис. 4).

Из треугольника $MA_\alpha B_\alpha$ определяются длины отрезков MB_α и MA_α соответственно по формулам: $s_{1\alpha} = t_{ст}/\sin\alpha_c$ и $s_{2\alpha} = t_{ст}/\mathrm{tg}\alpha_c$.

Из треугольника $MA_\alpha C_\alpha$, находящегося в кинематической плоскости $P_{nк}$ резания, определяем длину отрезка $A_\alpha C_\alpha$ по формуле $s_{3\alpha} = s_{2\alpha}\mathrm{tg}\lambda_к$.

Достроим треугольник $MB_\alpha D_\alpha$, находящийся на задней поверхности, а так как $A_\alpha C_\alpha = B_\alpha D_\alpha$, то можно определить угол между отрезками MB_α и MD_α по формуле $\mathrm{tg}\theta_\alpha = s_{3\alpha}/s_{1\alpha}$.

Длину отрезка MD_α определяем по формуле $s_{4\alpha} = s_{1\alpha}/\cos\theta_\alpha$, а кинематический задний угол $\alpha_к$ — по формуле $\sin\alpha_к = t_{ст}/s_{4\alpha} = \sin\alpha_c\cos\theta_\alpha$. При обработке угол $\alpha_к$ возрастает с момента врезания лезвия и до момента его выхода из зоны резания.

Передний и задний инструментальные углы зависят от материала заготовки. Передний угол γ должен обеспечивать сход стружки вдоль режущей кромки с наименьшей ее усадке [6], что возможно только при его увеличении до максимального значения.

Статический передний угол γ_c измеряется в главной секущей

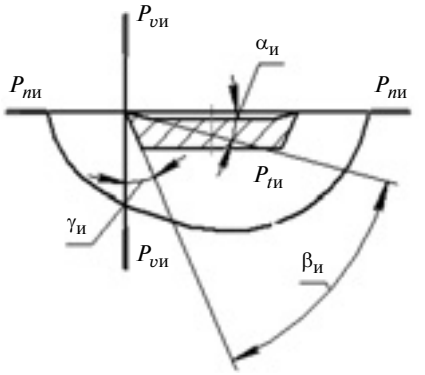


Рис. 2. Инструментальная система координат для многогранного резца

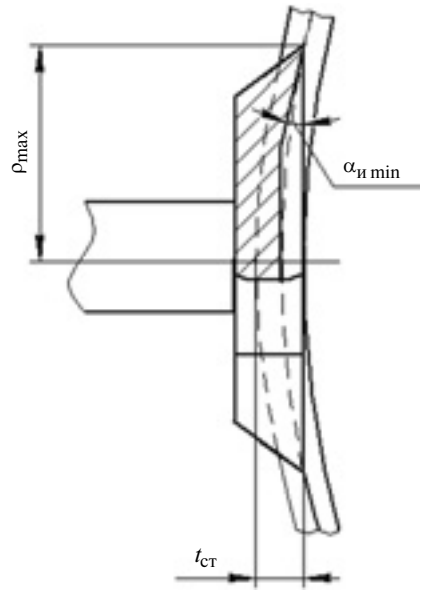


Рис. 3. Схема определения заднего угла

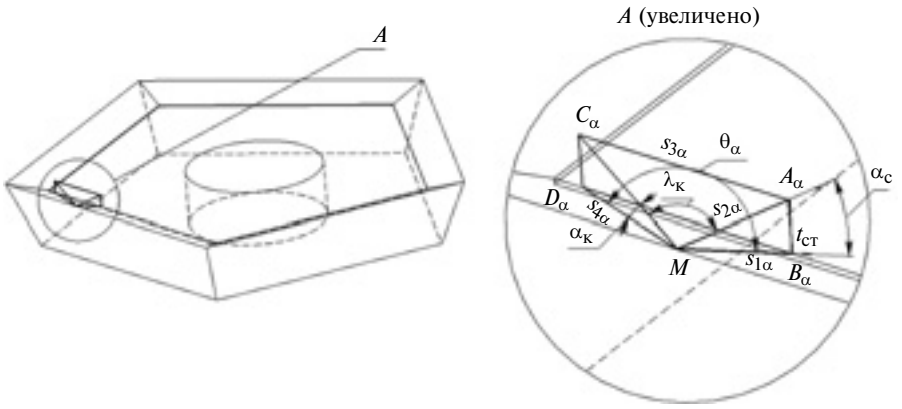


Рис. 4. Схема определения кинематического заднего угла

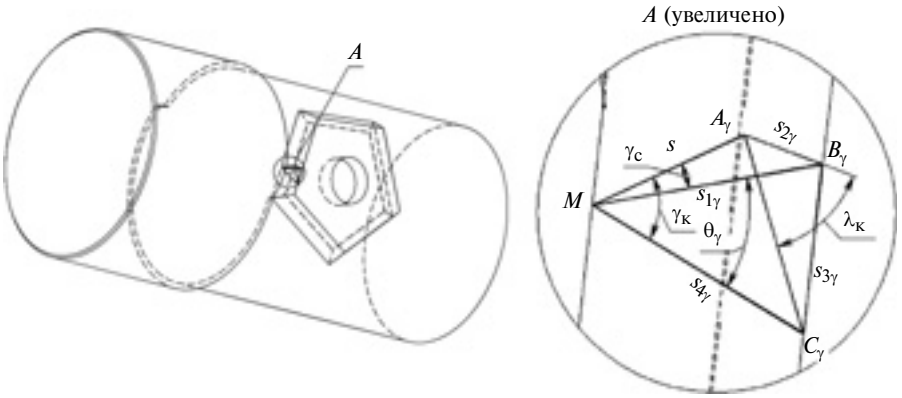


Рис. 5. Схема определения кинематического переднего угла

плоскости между передней поверхностью лезвия и статической основной плоскостью $P_{\upsilon с}$.

Кинематический передний угол $\gamma_к$ находится в главной секущей плоскости между передней поверхностью лезвия и кинематической основной плоскостью $P_{\upsilon к}$. Для его определения необходимо провести дополнительные построения (рис. 5).

Из треугольника $MA_\gamma B_\gamma$ определяем длину отрезка MB_γ по формуле $s_{1\gamma} = s/\cos\gamma_с$, где s — ширина режущей пластины (передней поверхности), мм; $\gamma_с$ — передний статический угол.

Длину отрезка $A_\gamma B_\gamma$ определяем по формуле $s_{2\gamma} = s\mathrm{tg}\gamma_с$.

Чтобы определить длину отрезка $B_\gamma C_\gamma$, необходимо построить треугольник $A_\gamma B_\gamma C_\gamma$. Тогда получим: $s_{3\gamma} = s_{2\gamma}\mathrm{tg}\lambda_к$.

Достроив треугольник $MB_\gamma C_\gamma$, находящийся на передней поверхности режущего лезвия, определим угол между отрезками MB_γ и MC_γ по формуле $\mathrm{tg}\theta_\gamma = s_{3\gamma}/s_{1\gamma}$. Длину отрезка MC_γ определим по формуле $s_{4\gamma} = s_{3\gamma}/s_{1\gamma}$, а передний кинематический угол — по формуле $\cos\gamma_к = s/s_{4\gamma} = \cos\gamma_с\cos\theta_\gamma$.

При врезании передний кинематический угол $\gamma_к$ максимален, а далее стремится к значению, равному статическому углу. Это говорит о том, что при обработке конструкционных материалов статический угол должен быть равен минимальному углу, обеспечивающему сход стружки вдоль режущей кромки с наименьшей усадкой.

Таким образом, установлено:

при ротационном точении угол наклона режущей кромки — величина переменная;

передний кинематический угол $\gamma_к$ при врезании изменяется от максимального значения до значения, равного переднему статическому углу $\gamma_с$, а задний кинематический угол $\alpha_к$ — от минимального значения до значения, равного заднему статическому углу $\alpha_с$;

полученные аналитические зависимости для углов резца позволяют на стадии наладки определить требуемые режимы обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Индаков Н. С. Бинчуров А. С.** Метод ротационного точения многогранными резцами // Вестник ассоциации выпускников КГТУ. 2011. № 20. С. 146—149.

2. **Ротационное** резание материалов: Учебник / П. И. Ящерицын, А. В. Борисенко, И. Г. Дривотин, В. Я. Лебедев. Минск.: Наука и техника, 1987. 229 с.

3. **Коновалов Е. Г.** Основы новых способов металлообработки: Учебник. Минск: Машиностроение, 1961. 286 с.

4. **Бобров В. Ф., Иерусалимский Д. Е.** Резание металлов самовращающимися резцами: Учебник. М.: Машиностроение, 1972. 111 с.

5. **Пат. 2463130 Рос. Федерации:** МПК B23B 27/12. Ротационный резец.

6. **А. с. 1126375 СССР:** МКИ[3] B 23 B 1/00. Способ лезвийной обработки валов с профилем "равноосный контур".

7. **Индаков Н. С, Бинчуров А. С.** Ротационное точение многогранными резцами // Современные инновации в науке и технике: Материалы IX междунар. науч.-практ. конф. Юго-Западного ГУ. Курск, 2012. С. 71—74.

УДК 621

Г. А. РАСТОРГУЕВ, д-р техн. наук (РУДН, г. Москва),
e-mail: rastorguev38@mail.ru

Оптимальная последовательность операций механической обработки с учетом технологической наследственности

Рассматриваются оптимальная последовательность операций механической обработки и влияние технологической наследственности на технологический процесс.

Ключевые слова: технологический процесс, последовательность операций, технологическая наследственность, финишная обработка.

The optimal sequence of machining operations and influence of manufacturing heredity on technological process are considered.

Keywords: technological process, processing sequence, manufacturing heredity, finishing.

На качество машиностроительной продукции и ее эксплуатационные свойства влияет совокупность всех технологических операций. Поэтому важной задачей проектирования является выбор рациональных сочетаний операций, обеспечивающих требуемые показатели качества продукции.

При выборе технологии изготовления деталей процесс обработки распределяют по операциям и устанавливают их последовательность и число. Последовательность операций определяется совокупностью постоянных и переменных факторов, в первую очередь, конструктивно-технологическими особенностями (используемый материал, размеры детали и точность изготовления), типом и возможностями производства, схемой базирования. В статье не рассматриваются организационные вопросы проектирования технологических процессов, которые подробно изложены в работе [1].

В машиностроении разработано и апробировано множество методов оптимальной последовательности технологических операций. Несмотря на многообразие деталей, есть общие положения и рекомендации, которые необходимо учитывать при их проектировании.

Технологический маршрут обработки включает в себя последовательность выполнения черновых, чистовых и отделочных операций. Технологически достигаемые на разных операциях обработки параметры точности и шероховатости поверхностей приведены в таблице. Назначение операций: черновых — удаление максимального припуска; чистовых — обеспечение требуемой точности; отделочных — формирование необходимой шероховатости поверхности. Вид заготовки (отливка, штамповка, пруток) определяет состав и последовательность первых черновых операций: например, для отливок корпусов — обдирка, старение, черновая обработка; для заготовок из прутка — отрезка, улучшение, черновая обработка. Не рекомендуется выполнять черновые и чистовые операции на одних и тех же станках с целью сохранения точности технологического оборудования и исключения повреждения обработанных поверхностей при установке деталей на последующих операциях. На черновых операциях при снятии наибольшего припуска выявляются такие дефекты заготовок, как трещины, расслоения, шлаковые включения, которые могут стать причиной брака в дальнейшем. Большое значение это имеет для деталей, работающих в герметичных средах — поршни, цилиндры, пневмо- и гидрокамеры и т. п.

В мелкосерийном производстве и при обработке крупногабаритных и массивных деталей приходится выполнять черновые и чистовые переходы за одну операцию. В этом случае сначала выполняют черновую обработку всех поверхностей, а затем чистовую обработку поверхностей, для которых она предусмотрена. Этим экономится время на перебазирование, однако для уменьшения износа узлов и механизмов станка, а следовательно, для сохранения его точности, приходится часто использовать дополнительные промежуточные проходы или заниженные режимы обработки.

Обработку начинают с поверхностей, которые предполагается использовать как технологические базы. Затем обрабатывают менее точные поверхности, самые точные поверхности обрабатывают последними и они должны иметь самые высокие эксплуатационные свойства. Например, при изготовлении ступенчатых цилиндрических валов финиш-

Обрабатываемые поверхности	Квалитеты точности *JT* (в числителе) и шероховатость поверхности *Ra* (в знаменателе) на операциях		
	черновых	чистовых	отделочных
Наружные цилиндрические и конические	$\frac{14 \div 12}{50 \div 12{,}5}$	$\frac{13 \div 6}{25 \div 0{,}4}$	$\frac{6 \div 3}{1{,}6 \div 0{,}01}$
Внутренние цилиндрические и конические	$\frac{13 \div 8}{25 \div 63}$	$\frac{10 \div 6}{6{,}3 \div 0{,}3}$	$\frac{6 \div 5}{1{,}6 \div 0{,}1}$
Плоские	$\frac{13 \div 10}{2{,}5 \div 1{,}6}$	$\frac{13 \div 6}{1{,}6 \div 0{,}4}$	$\frac{7 \div 3}{0{,}2 \div 0{,}04}$
Эвольвентные (зубья шестерен)	$\frac{10 \div 8}{12{,}5 \div 0{,}8}$	$\frac{7 \div 5}{3{,}2 \div 0{,}5}$	$\frac{6 \div 5}{1{,}25 \div 0{,}32}$

Примечание. Для эвольвентных поверхностей указаны степени точности по ГОСТ 1643—81.

ной операцией будет шлифование, а зубчатых колес — шевингование и хонингование. Второстепенные технологические переходы, такие как сверление мелких отверстий, резание канавок, обтачивание фасок, снятие заусенцев и др., рекомендуется выполнять при чистовой обработке.

Поверхности с точным взаимным расположением обрабатывают по возможности на одной операции с одной установки. При этом необходимо учитывать, что совмещение на одних и тех же станках черновых и чистовых операций может привести к снижению точности обработки вследствие повышенного изнашивания станка, обусловленного удалением на черновых операциях, как правило, максимального припуска.

Если деталь подвергают термической обработке (ТО), то технологический маршрут делят на две части: до и после ТО. При невозможности выполнения этого, необходимо правильно установить последовательность операций механической и термической обработок. Так, для снятия внутренних напряжений в отливках и поковках, снижения твердости и улучшения обрабатываемости применяют отжиг, следовательно, эта операция должна предшествовать механической обработке. При ТО деталей типа ходовых винтов возникают значительные продольные деформации, приводящие к погрешности шага резьбы. Например, при нарезании ходового винта с шагом 10 мм после закалки средний шаг составил 10,006 мм [2]. Поэтому после ТО следует предусмотреть операции, позволяющие исправить погрешности формы и расположения поверхностей, а в некоторых случаях и операции восстановления технологических баз. Химико-термическую обработку, повышающую твердость, износостойкость и контактную жесткость (закалка, цементация), рекомендуется выполнять перед чистовой обработкой. Обработку сложных поверхностей, требующих особой наладки станка, следует выполнять как самостоятельную операцию, например, обработку фасонных поверхностей, зубообработку, нарезание резьбы.

Для уменьшения межоперационных перемещений при определении последовательности операций обработки в серийном производстве необходимо учитывать расположение технологического оборудования в цехах. Число операций, выполняемых на станках с ЧПУ, определяется исходя из заданной точности формы и взаимного расположения поверхностей. При выборе последовательности операций необходимо учитывать некоторые особенности. Например, черновые операции могут включать предварительные операции, предназначенные для подготовки базирующих поверхностей и выполнения последующих операций за один установ. Для сложных корпусных деталей предусматривается операция разметки, определяющей положение заготовки.

При разработке технологического маршрута учитывают возможности станков. Желательно, чтобы весь процесс изготовления детали выполнялся на станках с ЧПУ. Если при обработке деталей, например корпусных, возникает необходимость в искусственном старении, то операции разделяют на черновые и чистовые. Последовательность черновых переходов определяют исходя из условия сокращения времени на выполнение вспомогательных перемещений, последовательность получистовых и чистовых переходов — исходя из уменьшения числа изменений положения инструмента и детали [3]. Для повышения стойкости режущего инструмента при обработке деталей на станках с ЧПУ в момент врезания инструмента в заготовку снижают его подачу на 30÷50 %, а после начала резания — повышают до рабочей [3]. Отметим, что для повышения стабильности работы режимы резания на станках с ЧПУ должны быть менее напряженными, чем на универсальных станках.

При механической обработке кроме изменений, связанных с резанием, возникают межоперационные структурные, физико-механические и геометрические изменения деталей, являющиеся следствием технологической наследственности (ТН), т. е. свойства заготовки, детали, сборочной единицы переносятся с предшествующих операций на последующие вплоть до готового изделия [4, 5]. Эти свойства могут быть как полезными, так и нежелательными. Поэтому все операции и технологические переходы следует рассматривать с учетом ТН. При разработке технологического процесса (ТП) в маршрут обработки вводятся дополнительные операции, учитывающие ТН, так как основные операции не обеспечивают требуемого качества изделия.

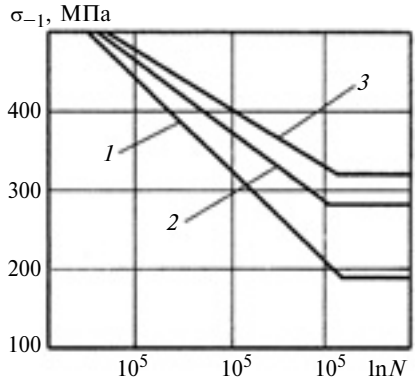
Заданное качество продукции обеспечивается не только рациональным построением цепочки ТП. Большое влияние на качество деталей оказывают межоперационные технологические наследственные связи, переходящие в эксплуатационные наследственные связи. Изменение свойств деталей и машины в целом (от заготовительных до сборочных операций) может быть выявлено при изучении ТН. Поэтому при разработке ТП необходимо, чтобы положительные свойства ТН передавались и усиливались, а отрицательные — уменьшались.

В технологическом маршруте обработки влияние начальных операций обычно слабее, чем финишных. Каждый технологический фактор по-разному влияет на конечные свойства детали. Влияние одних факторов сохраняется до финишной операции, есть факторы, которые действуют только на данной операции и не переходят на смежную. Например, волнистость поверхности может частично копироваться на одной-двух последующих опера-

циях, а затем ее влияние прекращается.

Это можно объяснить тем, что в технологической цепочке существуют "барьеры" [4, 5], которые отдельные технологические факторы не смогут преодолеть и тогда они не повлияют на конечные свойства обработанных поверхностей. Есть факторы, которые проходят такие "барьеры", но при этом значительно теряют исходную силу и мало влияют на конечные параметры обработки. Наиболее существенными "барьерами" являются термические операции (закалка, отпуск, отжиг, нормализация и др.) и упрочняющие операции, которые сопровождаются поверхностным наклепом деталей (обкатка роликами и шариками, дорнование отверстий, алмазное выглаживание, чеканка и др.). Операции ТО полностью ликвидируют неблагоприятные наследственные связи. Экспериментально установлено, что волокнистость, неравномерная плотность металла и всевозможные неметаллические включения способны пройти все "барьеры" и повлиять на конечные эксплуатационные свойства деталей. Это — пример устойчивой ТН.

В работе [4] приведен пример влияния ТН при оптимизации последовательности операций обработки партии ступенчатых валов из стали 45Х. Перед механической обработкой было проведено улучшение (отпуск) заготовки. Исследовали изменения поверхностного слоя валов, обработанных в следующей технологической последовательности: предварительное точение (Ra = 1,6÷3,2 мкм); термообработка ТВЧ (45÷52 HRC); черновое шлифование; чистовое шлифование; полирование поверхности (шероховатость не ниже Ra = 0,08÷0,04 мкм). Была установлена структурная неоднородность материала валов, полученная после чернового шлифования, которая не устранилась и на последующих чистовых операциях обработки. Причем глубина залегания отпущенного слоя



Зависимости изменения предела выносливости σ_{-1} от числа N циклов нагружения при финишной обработке:
1 — шлифование; *2* — тонкое точение; *3* — алмазное выглаживание

уменьшилась с 40 до 15 мкм, что привело к снижению износостойкости. Для устранения этого отрицательного проявления ТН ввели дополнительное шлифование после точения перед высокочастотной закалкой. Получение шероховатости не менее Ra = 1,25 мкм позволило избежать структурной неоднородности поверхностных слоев. Однако после предварительного шлифования наблюдалось некоторое снижение микротвердости поверхности, полученной после точения. Улучшение структуры поверхностных слоев окончательно обработанных валов и устранение зон отпуска с пониженной твердостью позволили повысить долговечность деталей в 1,8 раза.

Рассмотрим пример выбора финишной операции при обработке наружной поверхности партии валов из стали 45 [2]. Валы предварительно подвергли ТО до твердости 42÷44 HRC. Использовали три наиболее распространенных метода финишной обработки: 1) шлифование кругом из белого электрокорунда; 2) тонкое точение резцами из композитного материала; 3) алмазное выглаживание. Шероховатость поверхностей во всех случаях была в пределах Ra = 0,2÷0,3 мкм. Фактический предел выносливости, установленный после 10^7 циклов испытаний, составил: для первого метода — 190 МПа, второго — 260 МПа, третьего — 320 МПа. На рисунке приведены зависимости предела выносливости от числа циклов нагружения для деталей, прошедших разную финишную обработку [4].

Полученные данные свидетельствуют о значительном влиянии (от 190 до 320 МПа) вида обработки на эксплуатационные свойства деталей. Так, при шлифовании существенное значение имеет температурный фактор, при алмазном выглаживании — деформация, тонкое точение — промежуточное положение. Наиболее эффективно управлять ТН позволяет ТО заготовок. Например, изменяя режимы нормализации сталей, можно получать разные структуры. Фазовые превращения при ТО необходимо учитывать в ходе технологического процесса. Кроме выбора вида предварительной и окончательной обработки необходимо правильно сочетать методы механической и термической обработок. Структурное состояние стали, полученное при ТО, не только влияет на микротвердость поверхности, но и определяет величину и знак остаточных напряжении после окончательной механической обработки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Расторгуев Г. А.** Организационные принципы проектирования технологических процессов в машиностроении // Экономика и управление в машиностроении. 2010. № 5. С. 18—24.

2. **Технологическое** обеспечение и повышение эксплуатационных свойств деталей и их соединений / А. Г. Суслов, В. П. Федоров, О. А. Горленко и др. М.: Машиностроение, 2006. 448 с.

3. **Технология** машиностроения. Кн. 2. Производство деталей машин / Под ред. С. Л. Мурашкина. М.: Высшая школа, 2003. 295 с.

4. **Ящерицын П. И., Рыжов Э. В., Аверченко В. И.** Технологическая наследственность в машиностроении. Минск: Наука, 1977. 256 с.

5. **Технологическая** наследственность в машиностроительном производстве / Под общ. ред. А. М. Дальского. М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.

УДК 621.941.2/.31

В. В. ЮРКЕВИЧ, канд. техн. наук (МГТУ "Станкин"), e-mail: yurkevich35@gmail.com

Диагностика металлообрабатывающих станков

Рассматривается изменение траекторий оси заготовки и резца как диагностический признак повреждения узла станка.

Ключевые слова: траектория формообразования, диагностический признак.

The change in trajectories of workpiece axis and cutter are considered for damage diagnostics of race on sliding bearing of front support on MK-3002 turning machine tool.

Keywords: forming contour, diagnostic indicator.

Техническая диагностика включает теорию, методы и средства поиска и обнаружения дефектов металлообрабатывающих станков, т. е. устанавливает факты их наличия или отсутствия. Случайное изменение технического состояния станка затрудняет поиск причины и места отказа [1—3]. Диагностика включает сбор информации и сравнение ее с эталонными данными. Сбор информации — это получение измерений показателей и параметров, определяющих состояния отдельных узлов и деталей станка. Затем измеренные величины сравнивают с заданными номинальными, соответствующими нормальному технологическому процессу. Сложной задачей является определение номинальной величины, так как она устанавливает границу нормальной работы машины и ее работы в условиях, которые могут привести к браку или возникновению отказа. Однако эта граница далеко не однозначна и в свою очередь зависит от множества внешних факторов, например температуры окружающей среды, вибрации и др.

Сравнение преследует две задачи: сравнение измеренной и номинальной величин и определение изменения измеренной величины относительно ранее проведенных измерений, что позволяет наблюдать за изменениями рассматриваемого параметра во времени, т. е. прогнозировать показатели работоспособности. Обычно контролируют несколько параметров, характеризующих работу станка. Это могут быть: траектории формообразующих элементов станка; температура в характерных точках; силы, возникающие между отдельными деталями; путь; время переключения и др.

Так как номинальная величина параметра зависит от внешних воздействий, то обычно рассматривают максимальную и минимальную номинальную величину, т. е. можно говорить о некотором поле допуска — пределах номинального параметра. Если бóльшая часть номинальных параметров выходит за предельные значения, можно говорить об отказе. Окончательное решение обычно принимается с использованием систем искусственного интеллекта.

Сравнение измеренных и номинальных величин позволяет определить симптомы, являющиеся основой для проведения диагностики. По результатам сравнения устанавливаются места отказов и их причины. Сложнее всего выявить диагностические признаки технического состояния станка. В работах [4, 5] приводится большое число диагностических признаков, которые в той или иной мере характеризуют работоспособность станков. К ним относятся системы контроля износа и дефектов режущего инструмента, сил резания, температуры, вибраций и др. Однако эти признаки можно назвать признаками узкого применения для конструкции станка и технологического процесса. Они ни в коей мере не характеризуют параметрическую точность изготовляемых изделий. Наиболее информативным диагностическим признаком является изменение траекторий формообразования [6]. Применительно к токарным станкам — это траектории оси заготовки и резца.

Многолетние эксперименты показали, что траектория оси заготовки в большей степени характеризует макроформу обрабатываемой поверхности и в поперечном, и в продольном направлениях. Траектория режущей кромки резца в большей степени характеризует волнистость и шероховатость обрабатываемой поверхности.

Траекторию оси заготовки много лет исследовали на токарно-винторезном станке МК-3002 [7, 8]. В начале испытаний была записана траектория двух сечений заготовки (рис. 1, *а*). Через два года при исследовании теплового смещения оси шпинделя было выявлено повышение уровня шума при работе станка. И тогда снова записали эти траектории (рис. 1, *б*). Траектория на рис. 1, *б* отличается от траектории на рис. 1, *а* множеством резких

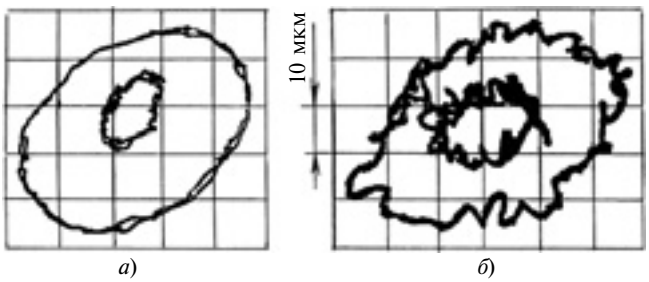


Рис. 1. Траектории оси заготовки при резании с n = 800 мин$^{-1}$, S = 0,05 мм/об и t = 0,27 мм в двух сечениях заготовки:
а — исправного подшипника; *б* — подшипника, поврежденного виброкоррозией

Рис. 2. Внутреннее кольцо подшипника качения со следами виброкоррозии

выбросов, свидетельствующих о том, что соприкасающиеся поверхности шариков и дорожки качения подшипника имеют дефекты. После разборки шпиндельного узла на поверхности внутреннего кольца подшипника были обнаружены следы виброкоррозии (рис. 2), которая при работе агрегата возникает в случае повреждения большинства выступов шероховатой поверхности. Подшипники, поврежденные виброкоррозией, издают сильный характерный шум (следствие дрожания деталей подшипника).

Таким образом, было установлено, что потеря плавности траектории оси шпинделя и явно просматривающиеся на ней микроколебания — признаки повреждения дорожек качения шарикоподшипника в результате виброкоррозии, которые и являются источниками характерного шума.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Диагностика** автоматизированного производства / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, М. П. Козочкин и др.; под ред. С. Н. Григорьева. М.: Машиностроение, 2011. 600 с.
2. **Козочкин М. П., Кочинев Н. А., Сабиров Ф. С.** Диагностика и мониторинг сложных технологических процессов с помощью измерения виброакустических сигналов // Измерительная техника. 2006. № 7. С. 30—34.
3. **Козочкин М. П., Сабиров Ф. С.** Оперативная диагностика при металлообработке — проблемы и задачи // Вестник МГТУ "Станкин". 2008. № 3. С. 14—18.
4. **Юркевич В. В.** К вопросу точности токарной обработки станков // Вестник машиностроения. 2004. № 2. С. 46—52.
5. **Юркевич В. В.** Контроль и диагностика процесса формообразования при обработке на токарных станках // Контроль. Диагностика. 2005. № 1. С. 45—50.
6. **Юркевич В. В.** Контроль точности токарной обработки // СТИН. 2004. № 10. С. 8—11.
7. **Юркевич В. В.** Система прогнозирования точности токарных станков // Вестник машиностроения. 2001. № 8. С. 44—48.
8. **Юркевич В. В.** Исследование точности токарных станков методом построения виртуальной копии обрабатываемой поверхности // Вестник машиностроения. 2006. № 12. С. 42—46.

УДК 621.791.76:621.7.044.2.001.5

А. В. КРОХАЛЕВ, О. А. АВДЕЮК, К. В. ПРИХОДЬКОВ, кандидаты технических наук, А. Н. САВКИН, С. В. КУЗЬМИН, доктора технических наук, В. И. ЛЫСАК, член-кор. РАН, д-р техн. наук (Волгоградский ГТУ), e-mail: kroch@vstu.ru

Технология взрывного плакирования заготовок твердыми сплавами

Рассмотрены нанесение порошковых покрытий и технология формирования твердых сплавов из смесей порошков карбида хрома с металлами при обработке взрывом. Определены режимы нагружения в зависимости от свойств металлической связки, а также ее структуры, твердости и антифрикционных свойств.

Ключевые слова: взрыв, порошковое покрытие, твердый сплав, карбид хрома, твердость, антифрикционные свойства.

The applying of powder coatings and hard alloy formation technology from mixtures of powder carbide with metals at explosive treatment are considered. The loading modes are determined depending on matrix metal properties and its structure, hardness and antifriction properties.

Keywords: explosion, powder coating, hard alloy, chromium carbide, hardness, antifriction properties.

Нанесение на поверхность деталей машин износостойких покрытий из твердых сплавов зачастую оказывается невозможным ввиду химического взаимодействия компонентов покрытия между собой и с материалом подложки в процессе плакирования. Одним из путей решения проблемы является технология взрыва, обеспечивающая не только качественную напрессовку порошкового слоя на поверхность заготовки, но и получение твердого сплава без спекания [1, 2].

На рис. 1 приведены схемы нагружения взрывом. Исходную порошковую смесь *2* обычно рас-

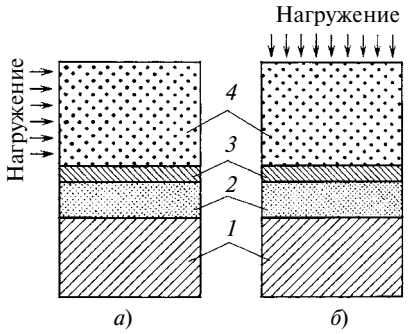


Рис. 1. Схемы нагружения порошка взрывом:
а — скользящее; *б* — нормально падающей детонационной волной

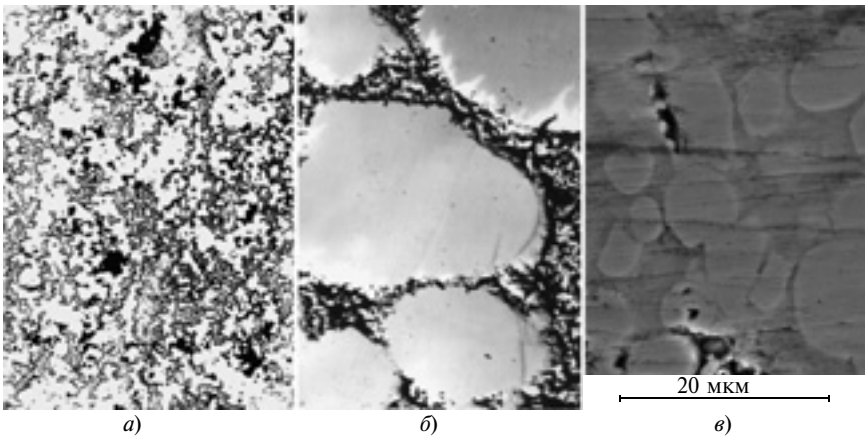


Рис. 2. Структуры твердых сплавов, полученных взрывом:
а — оптическая микроскопия; *б* — угольная реплика; *в* — шлиф без травления

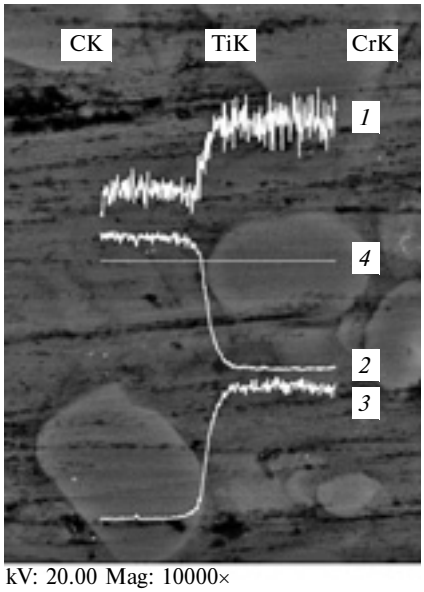


Рис. 3. Распределение элементов между фазами:
1, *2* и *3* — содержание соответственно C, Ti и Cr; *4* — линия сканирования состава

полагают на поверхности монолитной металлической подложки *1* и нагружают подрывом заряда вещества *4* через прокладку *3*, отделяющую продукты детонации от порошка. Прессование сопровождается распространением по порошковой смеси *2* падающей ударной волны и ее отражением от поверхности подложки *1* и прокладки *3*. При этом температура порошкового материала повышается в основном в ударной волне, движущейся по невозмущенному порошку, а максимальное давление сжатия достигается в отраженной волне [3], что является оптимальным при сварке давлением.

Исследование сплавов, полученных взрывом смесей порошков карбида хрома Cr_3C_2 с металлами Cu, Ni и Ti в широком диапазоне параметров нагружения (согласно расчетам температура порошка в ударных волнах изменялась от 200 до 1000 °С, а максимальное давление ударно-волнового сжатия — от 4 до 16 ГПа), показало, что в их структуре четко просматриваются образующие непрерывный скелет частицы карбидной фазы с металлической связкой и отдельными порами между ними (рис. 2).

Ввиду чрезвычайно малой продолжительности воздействий давления и температуры при взрыве диффузионные процессы не дают заметного изменения фазового состава материала; даже в химически активной системе Cr_3C_2—Ti весь титан остается в металлической фазе сплава, а хром и углерод — в карбидной (рис. 3) [2].

Пористость П покрытий из твердых сплавов с увеличением интенсивности нагружения (повышением давления) уменьшается (рис. 4, *а*) [1]. При этом порошковые смеси с Ti уплотняются значительно больше, чем смеси с Cu или Ni, что можно объяснить более низкой акустической жесткостью Ti. Поэтому легче заполняются промежутки между карбидными частицами при ударно-волновом взаимодействии их с частицами металлической связки при прохождении по порошку падающей и отраженной ударных волн.

Твердость сплавов повышается с увеличением интенсивности ударно-волнового воздействия и температуры порошка в процессе обработки. Причем при температуре 500÷600 °С возникает скачок, свидетельствующий о формировании прочного соединения составляющих исходной порошковой смеси (рис. 4, *б*) [2]. Это хорошо согласуется с изменением изломов образцов с межкристаллитного на транскристаллит-

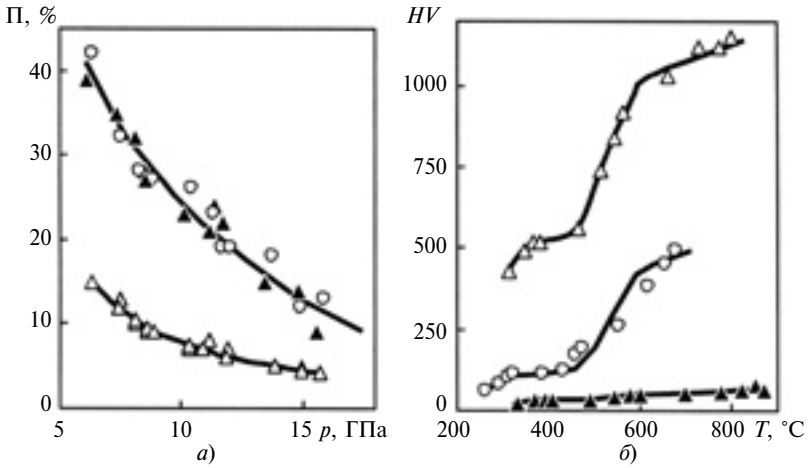


Рис. 4. Зависимости пористости П сплавов от давления *p* ударно-волнового сжатия (*а*) и твердости *HV* от температуры *T* порошка (*б*):
Δ — Cr_3C_2 + 30 % Ti; ○ — Cr_3C_2 + 30 % Ni; ▲ — Cr_3C_2 + 30 % Cu

ный при переходе через указанный участок (рис. 5).

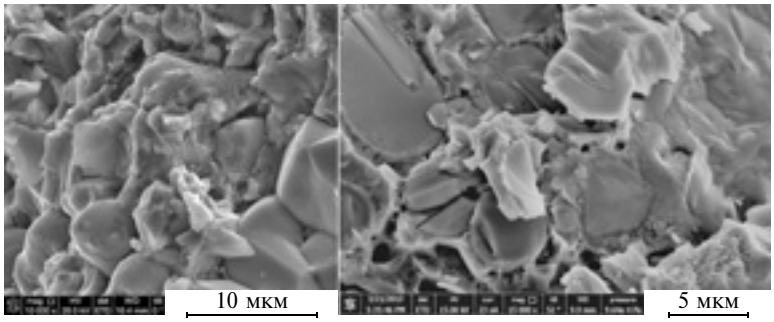
Нижняя температурная граница сварки частиц порошка на стадии уплотнения соответствует условиям сварки давлением [4], согласно которым для образования прочного соединения в твердой фазе необходима пластическая деформация обоих свариваемых компонентов, что в нашем случае может быть достигнуто лишь при нагревании карбидной составляющей смеси до температуры $(0{,}35 \div 0{,}4)\,T_{пл}$, где $T_{пл}$ — температура плавления основного карбида сплава (Cr_3C_2).

Следует отметить, что твердость сплавов с титановой связкой существенно выше твердости сплавов с никелевой и тем более с медной связкой, при использовании которой (см. рис. 4, *б*) карбидная и металлическая фазы не свариваются даже при благоприятных температурно-силовых условиях. Это можно объяснить высокой склонностью Ti к карбидообразованию и, следовательно, большей энергией его связи с карбидной фазой, обусловленной термодинамической устойчивостью межфазных границ, состоящих в нашем случае из атомов хрома, углерода и металла связки.

Удельная поверхность карбидной фазы в структуре твердых сплавов, полученных взрывом, может быть как больше, так и меньше такой же поверхности исходных карбидных частиц, что свидетельствует как об их дроблении, так и о совместной пластической деформации, сопровождающейся образованием непрерывного карбидного скелета сплава.

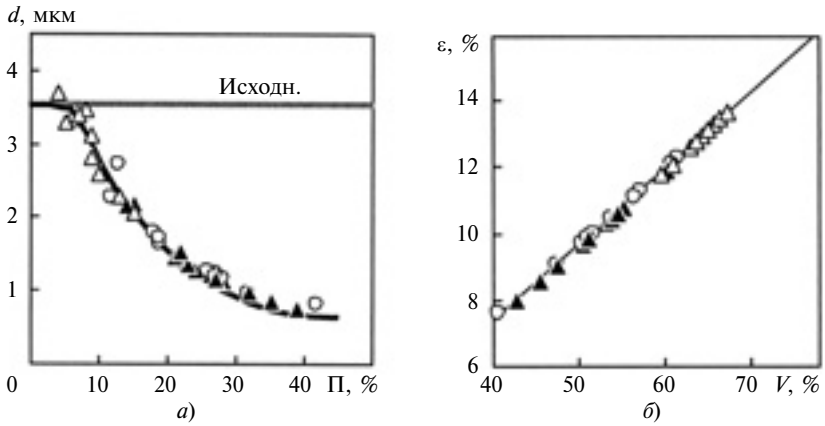
Исследования показали [5], что независимо от типа и количества металлической связки интенсивность дробления карбидных частиц однозначно связана с остаточной пористостью твердых сплавов, а степень их пластической деформации — с содержанием карбидной фазы в структуре сплава после взрыва (рис. 6). При режимах нагружения, обеспечивающих получение практически беспористых материалов, средний размер карбидного зерна равен среднему размеру частиц карбидной фазы в исходной смеси порошков. Это говорит о том, что в рассматриваемых условиях дробление карбидных частиц проходит преимущественно по механизму откола в результате выхода ударных волн на свободные поверхности, а деформация является следствием взаимодействия частиц друг с другом по контактным поверхностям.

Необходимое условие формирования работоспособного покрытия — достаточная прочность его сцепления с основой. Исследования показали, что при нагружении порошков нормально падающей детонационной волной (см. рис. 1, *б*) при оптимальных параметрах сжатия можно полу-



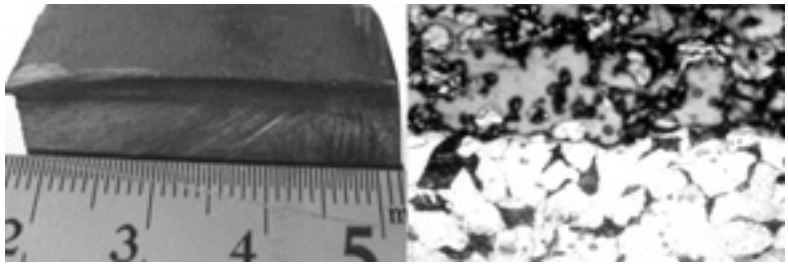
а) *б*)

Рис. 5. Изломы сплавов системы Cr_3C_2—Ti:
а — межкристаллитный; *б* — транскристаллитный



а) *б*)

Рис. 6. Зависимости пористости П от диаметра *d* карбидных частиц (*а*) от удельного объема *V* карбидной фазы в структуре твердых сплавов и степени ε их деформации (*б*):
обозначения те же, что на рис. 4



а) *б*)

Рис. 7. Покрытие из твердого сплава Cr_3C_2—Ti на стальной подложке (30 % связки, *p* = 13,9 ГПа, *T* = 730 °С):
а — общий вид; *б* — микроструктура зоны соединения

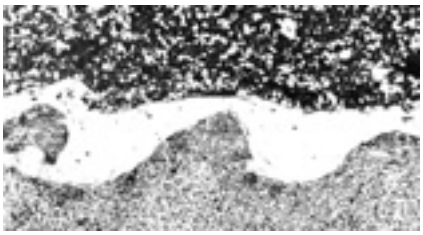


Рис. 8. Микроструктура зоны соединения порошкового покрытия Cr_3C_2—Ti (50 % связки) со стальной подложкой с использованием фольги

чать покрытия (рис. 7), прочность сцепления которых с металлической основой при испытаниях на срез составляла 25÷40 МПа [7]. При скользящем нагружении (см. рис. 1, *а*) при тех же режимах происходит полное или частичное удаление покрытия с поверхности подложки. Это можно предотвратить, если между слоем исходной порошковой смеси и основным металлом разместить, например, металлическую фольгу, которая под действием ударной волны соединится с подложкой по обычному для сварки взрывом механизму (рис. 8).

Обобщая сказанное, можно сформулировать основные принципы подбора состава порошковых твердых сплавов и режимы их нанесения на поверхность заготовок взрывом:

1) металл связки должен иметь самую низкую по сравнению с основным карбидом сплава акустическую жесткость и максимально высокую склонность к карбидообразованию (можно и даже желательно в качестве связки использовать более сильный карбидообразователь, чем металл основного карбида сплава);

2) гранулометрический состав исходной смеси порошков изначально должен соответствовать оптимальному размеру зерен порошка твердого сплава;

3) ударно-волновое нагружение должно обеспечивать температуру исходной смеси порошков не менее $(0{,}35\div0{,}4)T_{пл}$; существенное превышение этой температуры нерационально, так как практически не влияет на прочность поверхностей компонентов и общую твердость сплавов.

На примере сплавов системы Cr_3C_2—Ti видно, что предложенный подход позволяет без спекания получать практически беспористые покрытия, твердость которых при концентрации связки 30 % превышает 1200 *HV* (см. рис. 4, *б*), что существенно выше максимальной твердости материалов на основе карбида хрома, получаемых по традиционным технологиям.

Проведенные по разработанной методике [6] испытания полученных покрытий показали (таблица) их высокие антифрикционные свойства и бóльшую износостойкость при трении в воде по сравнению с силицированным графитом СГП-0,5 и твердым сплавом на основе карбида хрома Cr_3C_2 с никелевой связкой (КХН-20), изготовленных традиционными способами [1].

Показатель	Сплав системы Cr_3C_2 при содержании Ti, %				СГП-0,5	КХН-20
	20	30	40	50		
Минимальный коэффициент преимущественно жидкостного трения	0,085	0,089	0,090	0,093	0,054	0,123
Предельная нагрузка устойчивого преимущественно жидкостного трения, МПа	1,8	3,3	2,4	1,9	1,4	2,6
Коэффициент трения при граничном смазывании	0,112	0,100	0,122	0,129	0,076	0,152
Предельная нагрузка схватывания, МПа	4,6	11,5	7,3	6,9	3,5	5,2
Коэффициент трения в режиме схватывания	0,124	0,110	0,131	0,140	0,080	0,154
Объемный износ штифта за цикл испытаний, мм^3	1,0	0,2	0,7	0,6	0,9	0,7
Износ контртела из силицированного графита, мг	29	1	8	10	34	18
Объемный износ контртела, мм^3	12,1	0,4	3,3	0,2	14,2	7,5
Суммарный износ пары трения, мм^3	13,1	0,6	4,0	0,8	15,1	8,2

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Получение** износостойких покрытий из смесей порошков карбида хрома с металлической связкой с использованием взрывного нагружения / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Изв. Волгоградского ГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Вып. 4. 2010. № 5 (65). С. 117—122.
2. **Закономерности** формирования твердых сплавов из смесей порошков карбида хрома с титаном с использованием энергии взрыва / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Изв. вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2012. № 1. С. 32—37.
3. **Компьютерный** расчет параметров сжатия при нанесении порошковых покрытий взрывом / А. В. Крохалев, В. О. Харламов, С. В. Кузьмин, В. И. Лысак // Изв. Волгоградского ГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. Вып. 4. 2010. № 5 (65). С. 110—116.
4. **Красулин Ю. Л., Назаров Г. З.** Микросварка давлением. М.: Металлургия, 1976. 160 с.
5. **Крохалев А. В.** Определение размера и степени деформации карбидных частиц в структуре твердых сплавов, полученных взрывным методом. // Изв. Волгоградского ГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. 2012. № 14. С. 120—125.
6. **Крохалев А. В., Авдеюк О. А., Джанта Андри Имули.** Методика экспериментального исследования режимов трения в подшипниках скольжения // Изв. Волгоградского ГТУ. Сер. Прогрессивные технологии в машиностроении. Вып. 7. 2011. № 36 (86). С. 20—23.
7. **Методы** повышения прочности соединения покрытий системы Cr_3C_2—Ti, полученных взрывом, со стальным основанием / В. О. Харламов, А. В. Крохалев, С. В. Кузьмин и др. // Изв. Волгоградского ГТУ. Сер. Сварка взрывом и свойства сварных соединений. 2012. № 14. С. 110—119.

УДК 621.822

В. Е. ПИНИ (г. Москва), тел.: 8 (495) 304-0520

Сопротивление подшипников качения и скольжения вращению

Приведены результаты испытаний подшипников качения и скольжения на момент силы трения при небольших нагрузках.

Ключевые слова: подшипники качения и скольжения, момент силы трения, испытание, стенд.

The results of rolling and sliding bearing tests on friction force moment at different loading are presented.

Keywords: rolling and sliding bearings, friction force moment, test, test bench.

Потери на трение в подшипниковых узлах машин приводят к большим затратам топлива и электроэнергии. Для их снижения применяют подшипники качения, трение в которых меньше, чем в подшипниках скольжения. Так, на паровозах, выпускавшихся до Второй мировой войны, в узлах трения устанавливали только подшипники скольжения. На современных электровозах и тепловозах устанавливают в основном подшипники качения, за исключением опор коленчатых валов дизелей тепловозов, некоторых тяговых двигателей и опор роторов турбокомпрессоров.

В буксах вагонов подшипники качения впервые были установлены в 1911 г. Более широко подшипники скольжения стали заменять роликовыми подшипниками в 50-х годах XX века. Полностью парк грузовых вагонов в стране был переведен на роликовые подшипники в конце 1990-х годов, пассажирские вагоны были переведены раньше.

Исследования показали [1], что применение в буксах вагонов роликовых подшипников вместо подшипников скольжения позволило на 11 % уменьшить работу по перевозке вагонов и соответственно снизить энергозатраты.

Применение шариковых подшипников в турбокомпрессорах [2] позволило улучшить снабжение дизелей воздухом благодаря увеличению частоты вращения ротора на номинальном режиме на 5 % и на холостом ходу на 10 %, повысить давление воздуха на выходе из турбокомпрессора и его КПД. Время выбега ротора с подшипниками качения с холостого хода дизеля до его остановки увеличилось в 3 раза.

Для оценки потерь на трение в подшипниках провели стендовые испытания, позволившие определить моменты сопротивления вращению подшипников качения и скольжения методом выбега. Стенд (рис. 1) представляет собой раму *1* с двумя призматическими опорами *2*. На валу *3* ротора с напрессованным на него маховиком *5* устанавливали внутренние кольца подшипников качения, наружные кольца устанавливали в гнездах корпусов *4*, которые закрепляли хомутами на призматических опорах *2*. Вращение на вал ротора передавалось от электродвигателя *8* через кулачковую муфту *6*. В определенный момент муфту с помощью рукоятки *7* отсоединяли от электродвигателя и вал с маховиком продолжал вращаться по инерции, постепенно замедляясь до полной остановки в результате трения в подшипниках.

Момент трения в подшипниках определяли по уравнению для вращающегося твердого тела: $M = J(\Delta\omega/\Delta t)$, где $\Delta\omega$ — изменение угловой скорости тела за время выбега $\Delta t = t_2 - t_1$ (t_2 и t_1 — время соответственно в начале и конце измерения); J — момент инерции ротора, для данной установки $J = 43\ 704$ кг · мм^2. Масса ротора — 7,63 кг.

Испытывали: 1) шариковые подшипники 207 с габаритными размерами 35 × 72 × 17 мм (диаметр отверстия × наружный диаметр × ширина подшипника) и стальным змейковым сепаратором; 2) цилиндрические роликовые подшипники 42207Л с латунным беззаклепочным сепаратором, центрированным по наружному кольцу, и размерами, как у шариковых подшипников; 3) подшипники скольжения, изготовленные из бронзы в виде втулок с диаметром отверстия 43,8 мм и наружным диаметром 59 мм, по которому их устанавливали в стальные втулки в гнездах корпусов [4], расточенных под диаметр 72 мм.

Цапфами служили стальные втулки диаметром $d = 43{,}75$ мм, закрепленные на валу ротора. Для обеспечения равных условий сравнительных испытаний диаметр и длина рабочих поверхностей цапф были равны диаметру и длине внутренних

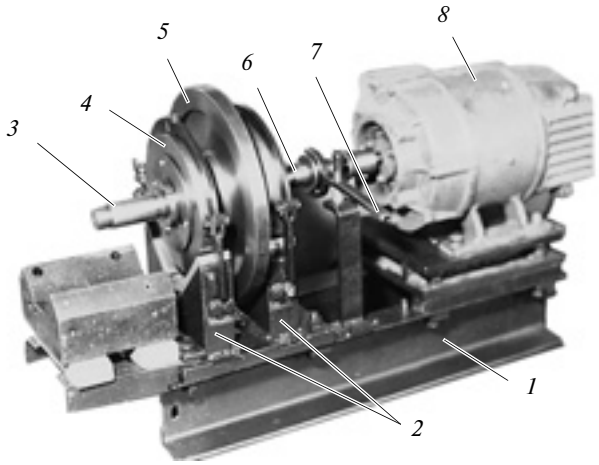


Рис. 1. Стенд для измерения моментов трения в подшипниках: *1* — рама; *2* — призматические опоры; *3* — вал ротора; *4* — корпус; *5* — маховик; *6* — кулачковая муфта; *7* — рукоятка; *8* — электродвигатель

колец роликоподшипников 42207Л. При длине рабочей поверхности цапфы $l = 15{,}5$ мм отношение $l/d = 15{,}5/43{,}75 = 0{,}35$. При массе ротора 7,63 кг на один подшипник действует удельное давление $q = P/(2dl) = 7{,}63 \cdot 9{,}81/(2 \cdot 43{,}75 \cdot 15{,}5) = 0{,}055$ Н/мм^2. Отсюда следует, что испытания проводили при небольших нагрузках.

В бронзовых подшипниках скольжения для подачи смазочного материала выполнены отверстия с холодильниками. Для смазывания использовали веретенное масло АУ с кинематической вязкостью 49 мм^2/с при температуре 20 °С и 12÷14 мм^2/с при температуре 50 °С. Подшипники скольжения смазывали периодически, подшипники качения — один раз перед опытами.

При испытаниях ротор разгоняли до частоты вращения 1410 мин$^{-1}$ и обкатывали подшипники 3 мин и еще 2 раза по 1 мин. Время выбега вала ротора регистрировали по секундомеру. В последнем опыте с помощью индукционного датчика (на рис. 1 не показан), установленного у торца вала, регистрировали частоту его вращения, которую записывали на ленту осциллографа одновременно со временем. В таблице приведены параметры опытных подшипников, которые регистрировали в ходе испытаний: время Δt выбега ротора с частоты вращения 1410 мин$^{-1}$ до нуля при $\Delta\omega = \pi n/30 = 3{,}14 \cdot 1410/30 = 147{,}6$ рад/с; температура $T_{\text{ок.с}}$ окружающей среды; моменты трения скольжения $M_{\text{ск}}$ и качения $M_{\text{кач}}$ и их отношение $M_{\text{ск}}/M_{\text{кач}}$, показывающее во сколько раз сопротивление вращению подшипников скольжения больше, чем подшипников качения. Из таблицы видно, что при $T_{\text{ок.с}} = 22$ °С сопротивление вращению шариковых подшипников в 7,2 раза меньше, чем подшипников скольжения, а роликовых — в 2,9 раза.

Можно заключить, что на величину трения в подшипниках влияют температура окружающей среды и вязкость масла (с повышением температуры вязкость уменьшается). Для подшипников скольжения при $T_{\text{ок.с1}} = 22$ °С момент трения $M_{\text{ск1}} = 121{,}7$ Н · мм, при $T_{\text{ок.с2}} = 29$ °С момент $M_{\text{ск2}} = 87{,}4$ Н · мм. Показатель, характеризующий сопротивление подшипников вращению, найдем из отношения $\Delta M/\Delta T$, т. е. при $\Delta T = T_{\text{ок.с2}} - T_{\text{ок.с1}} = 7$ °С и $\Delta M = M_{\text{ск1}} - M_{\text{ск2}} = 34{,}3$ Н · мм, для подшипника скольжения получим $\Delta M/\Delta T = 4{,}9$. Для шариковых подшипников этот показатель равен 0,82. Очевидно, что вязкость масла меньше влияет на трение в шариковых подшипниках, чем в подшипниках скольжения. Момент трения в роликовых подшипниках имеет среднее значение. Меньший момент трения в шариковых подшипниках, чем в роликовых, можно объяснить наличием в последних трения сепаратора о наружные кольца и роликов в гнездах сепаратора, тогда как в шариковых подшипниках существует только трение шариков в гнездах сепаратора. Следует отметить, что радиус трения роликового сепаратора о кольца значительно больше радиусов трения роликов (шариков).

Подшипник	Температура $T_{\text{ок.с}}$, °С	Время выбега, Δt, с	Момент трения M, Н · мм	Отношение $M_{\text{ск}}/M_{\text{кач}}$
Скольжения	29 22	73,8 53,0	84,7 121,7	— 1
Роликовый 42207Л	26 22	193,65 154,8	33,3 41,7	— 2,9
Шариковый 207	28 22	531,9 379,1	12,1 17,0	— 7,2

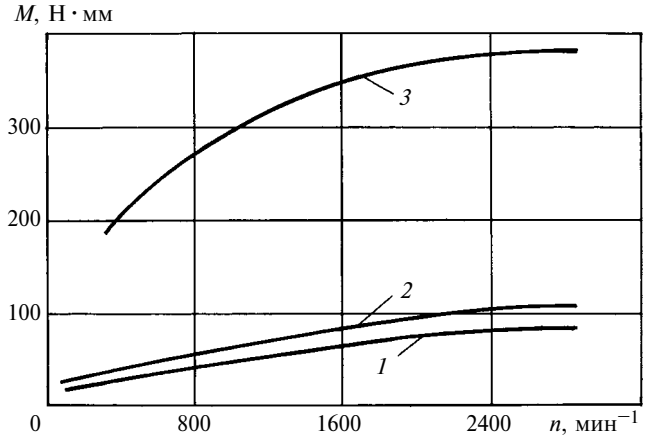


Рис. 2. Моменты трения в шариковых (*1*), роликовых (*2*) и подшипниках скольжения (*3*)

Затем на стенде был установлен электродвигатель с частотой вращения вала 3000 мин$^{-1}$. Частоту вращения вала ротора измеряли индукционным датчиком и электронным частотомером. Опыты проводили при температуре $T_{\text{ок.с}} = 10 \div 12$ °С. При всех частотах вращения вала ротора подшипники качения имели значительное преимущество перед подшипниками скольжения (рис. 2). Так, при $n = 2400$ мин$^{-1}$ трение в шариковых подшипниках было в 4,75 раза ниже, чем в подшипниках скольжения, в роликовых — в 3,6 раза, а при $n = 800$ мин$^{-1}$ — соответственно в 7,3 и 5 раз.

Для определения влияния маслоподающих дисков в турбокомпрессорах на сопротивление вращению ротора с подшипниками провели следующий опыт. На призматические опоры *2* (см. рис. 1) устанавливали цилиндрический бачок с маслом, через который проходил вал ротора. Один конец вала устанавливали в бесконтактных уплотнениях в торце бачка. На другой конец вала насаживали маслоподающий диск диаметром 120 мм. Этот торец бачка затягивали полиэтиленовой пленкой и наблюдали за состоянием масла. Вращение ротора с диском способствовало активному перемешиванию масла в бачке и его разбрызгиванию, что подтверждало

УДК 621.762.27

Е. В. АГЕЕВ, канд. техн. наук, Е. В. АГЕЕВА, канд. техн. наук (Юго-Западный ГУ, г. Курск),
e-mail: ageev_ev@mail.ru

Разработка оборудования и технологии получения порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов для промышленного использования[1]

Разработаны оборудование для электроэрозионного диспергирования и технология получения порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов для промышленного применения.

Ключевые слова: отходы, твердый сплав, электроэрозионное диспергирование, оборудование, порошок.

The equipment for electroerosion dispergation and production technology for powders production from waste of tungsten-containing hard alloys for industrial application are developed.

Keywords: waste, hard alloy, electroerosion dispergation, equipment, powder.

Сегодня в технике широко применяются твердые сплавы. Основой большинства твердых сплавов является карбид вольфрама. Анализ исследований, проведенных в этой области, показал, что большинство из них направлены на экономию вольфрама, так как этот материал относится к дефицитным и дорогим, а область его применения постоянно расширяется. С целью экономии природных ресурсов на предприятиях осуществляется сбор отходов твердых сплавов для их переработки. В настоящее время применяют несколько способов переработки отходов твердых сплавов, которые, как правило, характеризуются крупнотоннажностью, большой энергоемкостью, малой производительностью, при этом требуются большие производственные площади и соблюдение требований по экологической безопасности.

Одним из перспективных способов получения порошка вольфрама практически из любого токопроводящего материала, в том числе и твердого сплава, является электроэрозионное диспергирование (ЭЭД), отличающееся относительно невысокими энергетическими затратами и экологичностью. К достоинствам ЭЭД относится следующее:

получение особо чистых ультра- и нанодисперсных металлопорошков с полным исключением загрязнения при диспергировании, в том числе оксидами, так как рабочим органом является искровой разряд, а инертная среда предотвращает окисление;

возможность пассивации порошков оксидной пленкой путем введения в состав инертного газа контролируемого количества кислорода;

возможность диспергирования металлов и сплавов с особыми химическими и физическими свойствами (высокая тугоплавкость, твердость, хрупкость, радиоактивность, химическая активность и т. д.);

регулирование дисперсности порошков в широких пределах (от 3 нм до 5 мкм) — размер образующихся частиц зависит: от электрических параметров элементарных разрядов, конструкции реактора, среды диспергирования;

получение порошков сферической формы с аморфной, стеклообразной и мелкокристаллической структурой частиц, с высокоразвитой поверхностью (уникальные магнитные свойства, высочайшая химическая активность и сорбционная способность);

осуществление при диспергировании химических реакций и получение порошковых оксидов,

[1] Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства образования и науки России на 2013 г., тема № 1.12.13.

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 49)

обильное смазывание подшипниковых узлов в турбокомпрессоре.

Испытания показали, что при погружении диска в масло на 20÷30 мм сопротивление вращению ротора возрастает в 1,4÷1,5 раза по сравнению с сопротивлением вращению ротора, не погруженного в масло. Это свидетельствует о предпочтительном использовании принудительного смазывания в турбокомпрессорах вместо автономного [2].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Вопросы** перевода подвижного состава на роликовые подшипники / Под ред. канд. техн. наук В. С. Шаронина // Тр. ВНИИЖТа. Вып. 221. М.: Трансжелдориздат, 1961.

2. **Модернизация** турбокомпрессоров ТК-34 дизелей 10Д100 с применением подшипников качения / Р. А. Насыров, В. Е. Пини, Г. Г. Антюхин, С. В. Аркадсков // Сб. тр. ВНИИЖТа "Повышение топливной экономичности тепловозов". 1991. М.: Транспорт, 1991.

гидроксидов, нитридов, карбидов, шпинелей и т. д. в случае изменения свойств рабочей среды;

высокотемпературные процессы под воздействием плазмы искровых разрядов при температуре рабочей среды, близкой к нормальной;

экологическая чистота — отсутствие стоков, газовых и пылевых выбросов (при ЭЭД реагенты, как правило, не используются, в отдельных случаях возможно выделение водорода);

низкая удельная энергоемкость процесса (1,5÷3 кВт для производства 1 кг порошка);

компактность оборудования (0,8÷1 $м^2$ на одну установку).

Сегодня работы по ЭЭД достигли этапа опытно-промышленного производства. Однако аттестация и применение получаемых порошков сдерживаются отсутствием эффективного оборудования и технологии, позволяющих стабильно получать материалы с заранее заданными свойствами.

В настоящее время для ЭЭД металлов и других токопроводящих материалов применяется большое число различных схем генерирования импульсов электрической энергии, чаще всех используют два способа генерирования импульсов.

Первый способ применяют для получения импульсов электрической энергии значительной длительности с малой скважностью. В таких генераторах импульсов (ГИ) импульсы тока формируются в результате прерывания тока первичного источника питания. В ГИ от источника питания через коммутирующее устройство и токоограничивающую цепь в МЭП поступает электрическая энергия в моменты, когда коммутирующее устройство находится в проводящем состоянии. Длительность и скважность получаемых импульсов задают коммутирующим устройством, а амплитуда тока зависит от напряжения источника питания и сопротивления токоограничивающей цепи. Как правило, получаемая скважность невелика: при больших скважностях этот способ генерирования становится неэкономичным (источник питания рассчитывают на мощность импульса в отличие от средней мощности в случае генерирования импульсов вторым способом). Все ГИ, работающие по первому способу, следует отнести ко второму типу.

Один из вариантов этого способа генерирования импульсов электрической энергии используют в специальных электрических машинах и вентильных схемах. При этом коммутирующее устройство в явном виде отсутствует, а требуемые импульсы тока получают, используя напряжения источника питания специальной формы.

Для генерирования импульсов большой мощности с малой скважностью применяются электрические машины с магнитными системами специальной конструкции, что позволяет вместо постоянного или синусоидального напряжения генерировать импульсные напряжения. Однако подобные машины не могут генерировать импульсы с высокой частотой повторения, что необходимо для повышения производительности процесса.

Для получения импульсов с высокой частотой повторения используют генераторы, создающие гармонические колебания повышенной частоты (20÷40 кГц).

Данным способом можно генерировать и импульсы с невысокой частотой повторения, но большой мощности. Для этого в качестве источника питания используют непосредственно силовую, как правило, трехфазную сеть, иногда искажая синусоидальную форму напряжения, например с помощью магнитонасыщенных трансформаторов. Для получения импульсов тока с большей скважностью вентильные генераторы выполняют на управляемых вентилях (игнитроны, тиристоры) [1—3], что позволяет получать импульсы тока с регулируемыми в значительных пределах амплитудой и длительностью. Частота повторения задается источником питания.

При использовании полностью управляемых электронных или полупроводниковых приборов в качестве коммутирующих устройств данным способом можно генерировать импульсы с широкими диапазонами длительностей, частоты повторения и скважности. Разница будет заключаться только в типе используемого прибора: для генерирования импульсов с большой скважностью — импульсные лампы и тиристоры, для импульсов с малой скважностью — традиционные генераторные лампы и мощные транзисторы.

Применение транзисторов для генерирования импульсов электрической энергии весьма перспективно, но сдерживается отсутствием мощных транзисторов с требуемыми характеристиками.

Основные недостатки таких генераторов — реализация в нагрузке импульсных мощностей, не превышающих мощность питающей сети, и непосредственное включение нагрузки в цепь питающей сети [4].

Второй способ генерирования импульсов применяют для получения коротких импульсов с большой скважностью. В таких ГИ предварительно накапливается электрическая энергия и осуществляется ее импульсная отдача в нагрузку. Электрическая энергия от источника питания через токоограничивающую цепь в требуемом количестве запасается в накопителе. При этом коммутирующее устройство (в генераторах второго типа) или межэлектродный промежуток (в генераторах первого типа) должны находиться в непроводящем состоя-

нии. В определенный момент коммутирующее устройство переводится в проводящее состояние (в генераторах первого типа происходит пробой МЭП). Запасенная в накопителе электрическая энергия выделяется в МЭП в виде короткого импульса большой мощности, превышающей на несколько порядков мощность питающей сети.

МЭП обладает свойствами, необходимыми для успешной коммутации энергии. Если считать, что МЭП может играть роль коммутирующего устройства, то принципиальной разницы в цикле работы между генераторами импульсов второй группы первого и второго типов нет.

Так как МЭП заполнен жидким диэлектриком, проводимость которого практически равна нулю, то до определенного времени он, находясь в непроводящем состоянии, не препятствует накоплению энергии в накопителе. По мере увеличения энергии напряжение на накопителе повышается и достигает значения, при котором наступает нарушение электрической прочности промежутка между электродами, т. е. пробой. МЭП практически мгновенно переходит из непроводящего состояния в состояние высокой проводимости, энергия, запасенная в накопителе, выделяется в виде импульса большой мощности в рабочем промежутке, производя эрозию.

В качестве накопителя применяют электрохимические, электромеханические, индуктивные и емкостные накопители энергии [5—16].

Наилучшие показатели по импульсной мощности и допустимому току короткого замыкания, отнесенные к объему, массе и стоимости, в настоящее время имеют емкостные накопители энергии (электрические конденсаторы), широко применяемые в генераторах импульсов электроэрозионных установок.

В ГИ с большой скважностью второго типа можно использовать источники питания высокого напряжения и высоковольтные конденсаторы. Это позволяет получать большие мощности при сравнительно малых токах, что уменьшает потери энергии в коммутирующих устройствах. Однако в этом случае между генератором и МЭП следует устанавливать согласующий импульсный трансформатор.

Генераторы импульсов с большой скважностью второго типа имеют существенные преимущества перед аналогичными генераторами первого типа. Они позволяют получать короткие импульсы большой мощности с высокой частотой следования, что обеспечивает большую производительность ЭЭД. Кроме этого, если цепи заряда и разряда накопителя разобщены, то режим разряда на нагрузку практически не влияет на передачу энергии от питающей сети в накопитель. Поэтому в настоящее время генераторы импульсов второго типа начинают широко применять, несмотря на их сложность. В общем случае установка ЭЭД должна состоять из генератора импульсов, формирующего импульсы заданной амплитуды, длительности и частоты следования, а также реактора, в котором непосредственно и происходит диспергирование.

Впервые устройство для ЭЭД было предложено в 1943 г. [17]. Оно состояло из сосуда, наполненного жидкостью, в которой на параллельных осях вращались два диска, один из них был катодом, а другой — анодом. Между торцами дисков происходят искровые разряды, которые приводят к эрозии материала. Автоматическая следящая система поддерживает постоянный зазор, сближая диски по мере их изнашивания. Разряд генерируется колебательным контуром, настройка которого выполняется подбором соответствующих электрических параметров. Несмотря на существование данной конструкции, для ЭЭД использовали электроэрозионные станки, поэтому в 1972 г. Институтом неорганической и физической химии АН Киргизской ССР была предложена установка [18], в которой катод и анод были подвешены на шарнирах так, чтобы под действием тяжести опираться на промежуточный диск, находящийся между ними. При вращении промежуточного диска происходит отрыв от него электродов, что создает искровые промежутки. В этих промежутках происходит разряд, разрушающий электроды. Данные установки, наряду с электроэрозионными станками, имели серьезный недостаток — диспергируемый материал должен был иметь определенную геометрическую форму и его необходимо было закреплять.

В 1971 г. почти одновременно японские исследователи разработали установку для получения гидроокиси алюминия методом ЭЭД [19], которая состоит из диэлектрического сосуда с дистиллированной водой с погруженными двумя алюминиевыми электродами. Между электродами засыпают кусочки алюминия размерами от 10 до 20 мм. Кусочки замыкают электрическую цепь между электродами, на которые подают импульсы высокого напряжения от генератора импульсов. Данная установка, несмотря на ряд недостатков, позволяла производить ЭЭД кусочков насыпного материала. Дальнейшие разработки и патенты в основном были направлены на модификацию данной установки. Ее основной недостаток заключался в том, что под действием гидравлических ударов слой кусочков диспергируемого материала утрамбовывается, кусочки слипаются в монолитную массу, и разряды самопроизвольно прекращаются. Это было устранено в созданной в СССР установке [20] — через сетчатое днище подают пульсирующий поток жид-

Рис. 1. Структурная схема установки ЭЭД

кости, который периодически приводит кусочки металла в состояние кипящего слоя и вымывает продукты эрозии. Для данных установок разработана система быстрого отделения порошка от жидкости [21], в которую входят или различные емкости, где отстаивается порошок, или центрифуга, или пресс-фильтр.

Другой способ поддержания зазоров между кусочками диспергируемого материала — встряхивание сосуда, в котором происходит ЭЭД [22].

Еще один существенный недостаток данной установки — способ подведения электрических импульсов через электроды, расположенные по краям сосуда. Электроды должны состоять из материала, не загрязняющего порошок, и иметь определенную форму. Они быстро изнашиваются, после чего их необходимо быстро менять.

В 1983 г. было предложено устройство для ЭЭД, в котором электрические разряды создаются воздействием на куски диспергируемого материала электромагнитным полем [23]. Импульсы генерируются одновитковым индуктором, подключенным к источнику тока. Данная установка не получила дальнейшего развития.

Для повышения производительности было предложено выполнять ЭЭД при избыточном давлении 0,02÷10 МПа и повышенной температуре 80÷320 °С [24]. Производительность диспергирования вольфрама с использованием генератора импульсов с напряжением на электродах 600 В при частоте импульсов 5 кГц и мощности нагрузки 300 кВт составляет 18÷20 кг/ч [24].

Недостатком всех рассмотренных выше установок являются потери энергии на активных и реактивных сопротивлениях источников тока и кусочках диспергируемого материала, которые составляют 30÷40 % [25], а иногда и 50 %. Попытки снизить потери усложнением конструкции [24] и использовать эту энергию в других целях [25] не дали значимых результатов.

На основании проведенных исследований различных схем генераторов импульсов была разработана экспериментальная установка ЭЭД (рис. 1), состоящая из регулятора напряжения, генератора импульсов и реактора.

Регулятор напряжения служит для регулирования и установки необходимого переменного напряжения на входе генератора импульсов в диапазоне от 0 до 250 В. В качестве регулятора напряжения используют однофазный регулятор напряжения РНО-250-10 (ТУ 16.517.298—70).

Генератор импульсов, структурная схема которого представлена на рис. 2, собран по однозвенной схеме [26] с резонансным зарядом рабочего емкостного накопителя от источника постоянного напряжения. Он состоит из двух основных функциональных узлов — силового блока и блока управления.

В состав силового блока входят: однофазный выпрямитель, преобразующий в постоянное переменное напряжение от 0 до 250 В; опорная аккумуляторная батарея конденсаторов, фильтрующих выпрямленное напряжение; зарядный тиристорный коммутатор, обеспечивающий резонансный заряд рабочего накопителя и его отключение от опорной аккумуляторной батареи конденсаторов

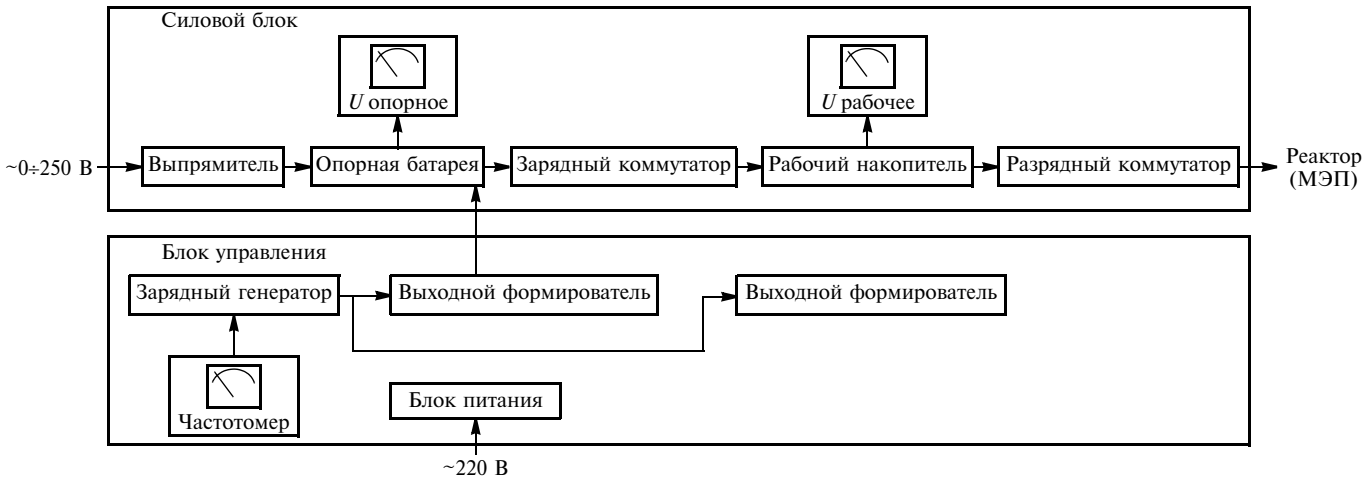


Рис. 2. Структурная схема ГИ установки ЭЭД

на время формирования импульса разрядного тока; рабочий накопитель электрической энергии, отдающий ее в нагрузку; разрядный тиристорный коммутатор, используемый для подключения заряженного рабочего накопителя к нагрузке и исключающий влияние режимов разряда на режимы потребления электрической энергии от питающей сети.

Для контроля за режимами работы силового блока предусмотрены вольтметр постоянного напряжения $U_{оп}$, индицирующий напряжения на опорной аккумуляторной батарее конденсаторов, и амплитудный вольтметр, индицирующий максимальное напряжение $U_{раб\ max}$ на рабочем накопителе.

Блок управления предназначен для выдачи сигналов управления зарядным и разрядным коммутаторами, определения и индикации рабочей частоты генератора импульсов, оперативного изменения режимов в процессе работы и настройки. В состав блока управления входят задающий генератор, выполненный на основе управляемого мультивибратора, с регулятором и индикатором рабочей частоты; выходные формирователи сигналов управления зарядным и разрядным коммутаторами и блок питания, обеспечивающий работу блока управления.

Генератор импульсов работает следующим образом. Задающий генератор вырабатывает тактовые импульсы, частота которых может регулироваться и отображается индикатором рабочей частоты. Из этих импульсов формируются импульсы управления зарядным и разрядным коммутаторами, поступающие на выходные формирователи, которые формируют сигналы управления зарядным и разрядным коммутаторами соответствующей частоты и амплитуды, а также обеспечивают гальваническую развязку (на основе оптопары) между силовым блоком и блоком управления и помехозащищенность блока управления.

Под воздействием сигналов управления зарядным и разрядным коммутаторами происходит их периодическое включение и выключение, с частотой, определяемой задающим генератором, в результате чего обеспечивается периодический заряд рабочего накопителя от питающей сети и его разряд на нагрузку (межэлектродный промежуток).

В данном ГИ в качестве задающего генератора можно использовать любой другой внешний генератор, а также персональный компьютер, генерирующий сигналы различной формы, частоты и амплитуды с помощью специальной программы генератора и установленной звуковой карты.

Реактор служит емкостью, в которую загружается диспергируемый материал, в которой и происходит ЭЭД. Объем реактора замкнут, и зона диспергирования охлаждается в результате конвекции рабочей жидкости, что обеспечивает улавливание всех частиц и работу со всем объемом загружаемого материала. Температура рабочей жидкости постоянна благодаря постоянному теплообмену между реактором и окружающей средой.

Отечественная промышленность выпускает вольфрамсодержащие твердые сплавы и накапливает их отходы трех групп, которые различаются по составу карбидной основы: вольфрамовые — группа ВК (сплавы WC—Co); титано-вольфрамовые — группа ТК (сплавы WC—TiC—Co); титано-тантало-вольфрамовые — группа ТТК (сплавы WC—TiC—TaC—Co). Для исследований выбраны пластины твердых сплавов ВК8, Т15К6 и ТТ20К9, отходы которых на предприятиях РФ скапливаются в наибольшем объеме. В качестве рабочих жидкостей (РЖ) использовались дистиллированная вода (кислородсодержащая РЖ) и осветительный керосин (углеродсодержащая РЖ).

Основные регулируемые параметры экспериментальной установки ЭЭД, непосредственно влияющие на порошкообразование: напряжение U на электродах, частота f следования импульсов, емкость C рабочего накопителя, расстояние l между электродами.

При диспергировании отходов твердых сплавов расстояние между электродами в реакторе оставалось постоянным — 100 мм, напряжение на электродах изменяли от 0 до 300 В, частоту следования импульсов — от 0 до 1000 Гц, емкость рабочего накопителя — от 2,5 до 80 мкФ.

Разработанный технологический процесс включает в себя следующие операции:

1) сбор и сортировка отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов по маркам (химическому составу);

2) очистка отходов от загрязнений, стружки;

3) загрузка отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов в реактор и подключение электродов;

4) заливка в реактор РЖ (дистиллированной воды или осветительного керосина);

5) выбор режимов диспергирования (напряжения, емкости конденсаторов и частоты следования импульсов);

6) электроэрозионное диспергирование;

7) отстаивание и слив рабочей жидкости;

8) отделение наноразмерной фракции центрифугированием;

9) химическая очистка порошка (при необходимости);

10) прокаливание порошка в печи при температуре 150÷200 °С в течение 20÷30 мин;

11) контроль качества.

В зависимости от использования полученных порошков данная технология может быть измене-

на. Например, операция отделения наноразмерной фракции центрифугированием может отсутствовать, если размеры частиц порошка полностью соответствуют требуемым, а операции отстаивания и слива РЖ — при использовании порошков при композиционном нанесении гальванических покрытий на основе железа. В этом случае в ванну железнения можно вносить не полученный сухой порошок, а суспензию, состоящую из порошка и дистиллированной воды, что значительно упрощает технологию получения порошков, а следовательно, снижает себестоимость — на получение 1 кг затрачивается 500 руб.

Таким образом, разработаны установка и технология получения порошков из отходов вольфрамсодержащих твердых сплавов методом ЭЭД, пригодные для повторного использования при изготовлении компактных изделий, в частности электродов для упрочнения кромок режущего инструмента различного назначения, а также в технологиях восстановления и упрочнения деталей машин железнением, различными видами наплавки и электроискрового легирования. Стоимость таких порошков в 2—3 раза ниже стоимости промышленных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Бедфорд Б., Хофт Р.** Теория автономных инверторов. М.: Энергия, 1969. 280 с.

2. **Данилевич С. И.** О переходе 3-фазного мостового преобразователя из режима непрерывного в режим прерывистого тока // Электричество. 1982. № 6. С. 61—63.

3. **Руденко В. С., Сенько В. И., Чиженко И. М.** Преобразовательная техника. Киев: Вища школа, 1978. 424 с.

4. **Агеев Е. В.** Получение порошков из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного диспергирования // Электрометаллургия. 2011. № 10. С. 24—27.

5. **Артамонов Б. А. Круглов А. И., Стебаев Л. И.** Генераторы импульсов для электроэрозионной обработки. М.: Машиностроение, 1976. 124 с.

6. **Беркович Е. И.** Тиристорные преобразователи повышенной частоты для электротехнологических установок. Л.: Энергоатомиздат, 1983. 208 с.

7. **Бойко А. Ф.** Тиристорный генератор импульсов для высокопроизводительной электроэрозионной вырезки // Электронная обработка металлов. 1981. № 2. С. 78—80.

8. **Автономный** резонансный инвентор в режиме параметрической стабилизации тока / И. В. Волков, В. Н. Губаревич, В. Ю. Матвеев и др. // Техн. электродинамика. 1982. № 16. С. 22—27.

9. **Стабилизаторы** тока на базе последовательных инверторов со встречно-параллельными вентилями / В. Н. Губаревич, В. П. Кабан, В. Ю. Матвеев и др. // Стабилизированные источники питания для потребителей с переменной нагрузкой. Киев: Наукова думка, 1984. С. 11—18.

10. **Казекин В. И., Карвовский В. Б., Щерба А. А.** Установка для электроэрозионного диспергирования алюминия в воде // Опыт внедрения и промышленная эксплуатация тепломассообменных аппаратов и реакторов. Днепропетровск, 1980. С. 129—131.

11. **Милях А. Н., Муратов В. А., Щерба А. А.** Особенности управления режимами источников питания установок электроэрозионного диспергирования металлов // Проблемы преобразовательной техники. Ч. 5. Киев: 1983. С. 201—204.

12. **Милях А. Н., Щерба А. А., Муратов В. А.** Стабилизация режимов объемного электроэрозионного диспергирования металлов // Состояние и перспективы развития электротехнологии. Иваново: ИЭИ им. В. И. Ленина, 1985. Ч. 2. С. 161—162.

13. **Пентегов И. В.** Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии. Киев: Наукова думка, 1982. 424 с.

14. **Шидловский А. К., Щерба А. А., Муратов В. А.** Электроэрозионные технологические установки для получения порошков металлов // Электрофизические технологии в порошковой металлургии. Рига: Рижский политехн. ин-т, 1986. С. 106—108.

15. **Повышение** качественных показателей и стабилизация электроэрозионного диспергирования металлов с учетом взаимного влияния характеристик источника питания и технологического аппарата / А. К. Шидловский, А. А. Щерба, В. А. Муратов и др. // Совершенствование электрооборудования и средств автоматизации технологических процессов промышленных предприятий. Комсомольск-на-Амуре: КнАПИ, 1986. С. 98—99.

16. **Щерба А. А.** Основные принципы построения многофазных стабилизированных источников питания установок электроэрозионного диспергирования металлов в жидкости // Проблемы преобразовательной техники. Ч. 6. Киев: ИЭД АН УССР, 1983. С. 59—62.

17. **А. с. 70000 СССР:** Мкл. В 22 F 09/00. Способ получения порошков и устройство для его осуществления.

18. **А. с. 322249 СССР:** Мкл. В 23 Р 1/02. Установка для получения продуктов электроэрозии металлов.

19. **Ватари И.** Получение металлических порошков методом электроискрового разряда // Киндзоки. 1977. № 11. С. 20—22.

20. **А. с. 663515 СССР:** Мкл.^{2} В 23 Р 1/02. Устройство для электроэрозионного диспергирования металлов.

21. **А. с. 956153 СССР.** Установка для получения порошков электроэрозионным диспергированием.

22. **Байрамов Р. К.** Разработка процессов получения высокодисперсных порошков при электроэрозии металлов в водных растворах // Дис. ... д-ра. техн. наук. М., 2010. 254 с.

23. **А. с. 99788 СССР.** Способ и устройство для электроэрозионного диспергирования металлов.

24. **А. с. 1107965 А СССР:** МКИ В 22 F 9/14. Способ получения порошков и паст.

25. **А. с. 1445111 А1 СССР:** МКИ 6С 01 F/42. Установка для получения порошков.

26. **А. с. 286716 А СССР.** Способ диспергирования электрическим разрядом токопроводящих материалов в жидкой среде.

УДК 621.9.04.001.24

А. Л. ВОРОНЦОВ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: mtl3@bmstu.ru

Теоретическое обеспечение технологической механики. 7. Осесимметричная задача теории пластичности. Часть 3*

Проанализированы противоречия в известных теориях определения силы при осадке и волочении цилиндрической заготовки.

Ключевые слова: теория пластичности, осесимметричная задача, цилиндрическая заготовка, осадка, волочение.

The contradictions in known theories of force definition at upset and drawing of a cylindrical workpiece are analyzed.

Keywords: theory of plasticity, axisymmetric problem, cylindrical workpiece, upset, drawing.

После изложения классической системы уравнений осесимметричной задачи [1] и подробной демонстрации их конкретного применения [2] покажем, что противоречивые допущения, при которых вообще нельзя решить задачу в теории пластичности, можно без каких-либо затруднений использовать в упрощенных инженерных методах теории обработки металлов давлением (ОМД).

Проанализируем недостатки считающегося наиболее обоснованным решения задачи по определению силы осадки, выполненного Е. П. Унксовым инженерным методом (частным случаем решения Е. П. Унксова является известное решение Э. Зибеля, при котором касательные напряжения приняты постоянными по всей поверхности контакта).

Для того чтобы превратить точное уравнение равновесия (1)*1 в определяющее инженерное уравнение, Е. П. Унксов использует следующие допущения (в изложении М. В. Сторожева [3, с. 254—259]:

1. Напряжения σ_ρ и σ_θ на контактной поверхности не зависят от координаты $z = h$, так как она постоянна в любой точке поверхности.

2. Касательные напряжения $\tau_{\rho z}$ являются линейной функцией z, т. е. определяются формулой

$$\tau_{\rho z} = \tau_к\left(\frac{2z}{h} - 1\right). \qquad (77)$$

На основании допущений 1 и 2 Е. П. Унксов переходит от уравнения равновесия (1) в частных производных к уравнению равновесия в простых производных:

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \frac{d\tau_{\rho z}}{dz} + \frac{\sigma_\rho - \sigma_\theta}{\rho} = 0. \qquad (78)$$

3. Так как задача осесимметрична, то $\xi_\rho = \xi_\theta$ и $\sigma_\rho = \sigma_\theta$.

4. Принято упрощенное условие пластичности $\sigma_\rho - \sigma_z = \sigma_s$, согласно которому

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\rho} = \frac{d\sigma_z}{d\rho}, \qquad (79)$$

что позволяет с учетом допущений 2—4 привести уравнение (78) к элементарному определяющему виду:

$$\frac{d\sigma_z}{d\rho} + \frac{2\tau_к}{h} = 0. \qquad (80)$$

5. Принято, что на одном участке контактной поверхности (см. рис. 3*2, участок 1) касательные напряжения определяются законом Амонтона—Кулона $\tau_к = \mu\sigma_n$, т. е. пропорциональны нормальному напряжению и, соответственно, возрастают в направлении оси симметрии аналогично росту $\sigma_n = |\sigma_z|$, на участке 2 касательные напряжения постоянны и достигают предельной величины $\tau_к = 0{,}5\sigma_s$, а на участке 3 — линейно уменьшаются до нуля.

В результате трех решений уравнения (80) соответственно с одним из трех условий, указанных допущением 5, Е. П. Унксов в общем случае получил распределение нормальных и касательных напряжений на контактной поверхности, показанное на рис. 3.

Рассмотрим правомерность каждого допущения.

Допущение 1. Вместо приведенного Е. П. Унксовым псевдообоснования было бы лучше просто ука-

* Продолжение цикла. Начало см. "Вестник машиностроения" № 1÷10 за 2013 г., продолжение — № 12 за 2013 г.

*1 Формулы (1)÷(18) — см. [1], формулы (19)÷(76) — см. [2].

*2 Рис. 1 — см. [1], рис. 2÷4 — см. [2].

зать, что принято допущение о независимости нормальных напряжений от координаты z. А используя "обоснование" Унксова, можно "доказать", что вообще любые напряжения являются постоянными во всем объеме заготовки. Действительно, если взять любую поперечную плоскость, например проходящую посредине высоты заготовки, то по аналогии с утверждением 1 можно заявить, что поскольку координата $z = h/2$ любой точки этой плоскости постоянна, то напряжения σ_ρ, σ_θ и σ_z не зависят от координаты z (и так для всего объема). Далее также можно рассмотреть и произвольные вертикальные линии, например с координатой $\rho = d/4 = \text{const}$ и т. д., после чего сделать вывод, что напряжения не зависят и от координаты ρ. Кроме того, Е. П. Унксов, считая на основании равенства $z = h = \text{const}$, что нормальные напряжения не зависят от координаты z, почему-то не считает, что на том же основании $\tau_{\rho z}$ не должно зависеть от координаты z, в связи с чем на контактной поверхности следует принять $d\tau_{\rho z}/dz = 0$.

Допущение 2. Нетрудно доказать, что допущение в виде выражения (77) противоречит как допущению 3, так и условию сплошности. Действительно, в статье [2] было доказано, что равенства $\xi_\rho = \xi_\theta$ и $\sigma_\rho = \sigma_\theta$ возможны только при осевой скорости v_z, определяемой выражением (26). Для выполнения зависимости (77), т. е. зависимости $\tau_{\rho z} = \tau_к f_6(z)$, с учетом формулы (6) и равенств (7), (27)—(29) необходимо обеспечить функциональную зависимость $\eta_{\rho z} = f_7(z) \neq 0$. Следовательно, с учетом формулы (12) и выражения (26) получаем уравнение

$$\partial v_\rho/\partial z = f_7(z); \tag{81}$$

откуда

$$v_\rho = \int f_7(z)\partial z + f_8(\rho) + C_3, \tag{82}$$

где C_3 — постоянная, определяемая из условия постоянства расхода [4, с. 202].

Наличие в формуле (82) слагаемых $\int f_7(z)\partial z$ и C_3 показывает, что равенство $v_\rho = 0$ при $\rho = 0$ не выполняется, т. е. имеет место нарушение сплошности на оси симметрии. Кроме того, с учетом формул (9) и (10) имеем:

$$\xi_\rho = \frac{\partial f_8(\rho)}{\partial \rho}; \tag{83}$$

$$\xi_\theta = \frac{\int f_7(z)\partial z + f_8(\rho) + C_3}{\rho}, \tag{84}$$

т. е. $\xi_\rho \neq \xi_\theta$ и, соответственно, $\sigma_\rho \neq \sigma_\theta$.

Заметим, что формула (82) полностью совпадает по структуре с формулой поперечной скорости, соответствующей плоской задаче Прандтля об осадке длинной полосы [5, с. 189, формула (206)], и приводит к тем же самым некорректным результатам [5, с. 190].

Допущение 3. Равенства $\xi_\rho = \xi_\theta$ и $\sigma_\rho = \sigma_\theta$, необходимые для построения упрощенного уравнения равновесия, приняты бездоказательно. Широко распространенное мнение, что осесимметричная деформация предопределяет эти равенства не только для оси симметрии, но и для всего объема деформируемого тела, является неверным. Докажем это.

Выберем кинематически возможную осевую скорость в более сложном по сравнению с формулой (48) общем виде

$$v_z = -f(z) - C_3 z(h - z)\rho, \tag{85}$$

в принципе также удовлетворяющем имеющимся граничным условиям $v_z = -v_0$ при $z = h$, а также $v_z = 0$ при $z = 0$. Если формула (48) фактически соответствует гипотезе плоских сечений (поперечные сечения в процессе осадки остаются плоскими), то формула (85) позволяет учесть неплоскостность, например, в условиях осадки с наличием застойных зон (см. рис. 4).

Подставив формулу (85) в условие несжимаемости (50), получим уравнение

$$\frac{1}{\rho}\left[\frac{\partial}{\partial \rho}(v_\rho \rho)\right] = \frac{\partial f(z)}{\partial z} + C_3(h - 2z)\rho, \tag{86}$$

согласно которому радиальная скорость

$$v_\rho = \frac{\partial f(z)}{\partial z}\frac{\rho}{2} + C_3(h - 2z)\frac{\rho^2}{3} + \frac{f_6(z)}{\rho}. \tag{87}$$

Из граничного условия $v_\rho = 0$ при $\rho = 0$ следует, что $f_6(z) = 0$, т. е.

$$v_\rho = \frac{\partial f(z)}{\partial z}\frac{\rho}{2} + C_3(h - 2z)\frac{\rho^2}{3}. \tag{88}$$

Подставив выражение (88) в формулы (9) и (10), получим:

$$\xi_\rho = \frac{1}{2}\frac{\partial f(z)}{\partial z} + \frac{2}{3}C_3(h - 2z)\rho; \tag{89}$$

$$\xi_\theta = \frac{1}{2}\frac{\partial f(z)}{\partial z} + \frac{1}{3}C_3(h - 2z)\rho. \tag{90}$$

Сравнив выражения (89) и (90) видим, что при $\rho = 0$, т. е. на оси симметрии, равенство $\xi_\rho = \xi_\theta$ выполняется, но в остальном объеме заготовки при $\rho > 0$ имеем $\xi_\rho \neq \xi_\theta$ и, соответственно, $\sigma_\rho \neq \sigma_\theta$.

Не случайно Р. Хилл по поводу решения Э. Зибеля заметил: "К тому же, σ_θ полагается равным σ_ρ; величина ошибки, вносимой этим предположени-

ем, неизвестна" [6, с. 316—317]. Укажем, что автором данного цикла статей решен целый ряд осесимметричных задач, в которых $\xi_\rho \neq \xi_\theta$ и $\sigma_\rho \neq \sigma_\theta$, [7, с. 175, 295; 8, с. 35, 43, 56].

Допущение 4. Предельно упрощенное уравнение (80) прямо получено из принятия рассмотренных выше необоснованных допущений и дополнительного разбора не требует: каковы допущения, таково и вытекающее из них уравнение.

Допущение 5. Выше было строго доказано, что при соблюдении упомянутых допущением 3 равенств контактные касательные напряжения неизбежно будут уменьшаться в направлении оси, что противоречит как допущению о том, что на одном участке контактной поверхности касательные напряжения определяются законом Амонтона—Кулона, так и допущению, что на другом участке касательные напряжения постоянны. Таким образом, при условии равенства радиального и тангенциального напряжений оба принятых относительно касательных напряжений допущения являются невозможными.

Наличие участка 2 (см. рис. 3) с постоянными касательными напряжениями объясняется тем, что на этом участке, вследствие роста нормальных напряжений σ_z, касательные напряжения, определяемые законом Амонтона—Кулона, начинают превосходить предельно возможную в условиях осевой симметрии величину $\tau_к = 0{,}5\sigma_s$. Поэтому на данном участке касательные напряжения принимаются постоянными, равными предельной величине $0{,}5\sigma_s$. Следуя данной логике, участка 3, на котором касательные напряжения приняты линейно падающими до нуля, вообще не должно быть, так как напряжения σ_z на этом участке еще более возрастают, т. е. тут с еще большим основанием касательные напряжения следует принять постоянными, равными предельной величине. Однако для устранения очевидных недостатков решения, связанных с получением излома на эпюре нормальных напряжений и разрыва касательных напряжений на оси симметрии, принятая логика решения нарушается искусственным введением участка 3.

Так как участок 3 исходными положениями решения никак не мотивирован, то невозможно доказательно определить радиус его границы с участком 2. В результате этот радиус задается бездоказательно, со ссылкой на достаточное приближение к экспериментальным данным. Такое исследование является уже не теоретическим, а полуэмпирическим.

Естественно, что наименьшие контактные касательные напряжения, действующие на участке 3, должны максимально облегчать на нем радиальное скольжение металла. Однако данный участок вопреки теоретическому смыслу называется "зоной прилипания". Такая подмена понятий позволяет на основании малой деформации кольцевых рисок, нанесенных в данной зоне, экспериментально "доказать" наличие участка 3 и определить его протяженность, хотя на самом деле отсутствие деформации никак не подтверждает линейного падения касательных напряжений до нуля. Иными словами, "прилипание" никак не доказывает малое трение, стремящееся к нулю.

Столь большое число противоречащих друг другу предположений, принимаемых без всякого анализа в инженерных методах, приводит к непредсказуемости надежности результатов анализа. В итоге решения инженерным методом задач, более сложных, чем осадка, часто оказываются малопригодными для практического использования [9]. Это и побудило выполнить для наглядности изложенное выше достаточно строгое теоретическое решение задачи об осадке с трением, основанное на минимальном числе допущений и лишенное перечисленных недостатков.

Отметим, что в разных упрощенных методах теории ОМД встречаются совершенно разные противоречия, но иногда на основе разных некорректных допущений получают одни и те же формулы. Например, та же формула Э. Зибеля получена методом баланса работ при использовании поля скоростей (33), (34), при котором не соблюдается допущение (77), а касательное напряжение $\tau_{\rho z}$ вообще будет равно нулю [3, с. 227, 228]. Точно также на основе некорректного поля скоростей методом баланса работ в учебнике [3, с. 290—292] получена формула силы прессования прутков, которую ранее получил И. Л. Перлин, сделав несколько грубых ошибок, подробно рассматриваемых далее. Таким образом, *совпадение формул при получении их разными методами теории ОМД вовсе не доказывает их корректность.* Просто иногда разные ошибки в разных методах приводят к одинаковым результатам.

6[*3]**.** Применительно к осесимметричной задаче Критик уверенно заявляет, что по числу допущений теория волочения, разработанная автором, ничуть не лучше, чем теория И. Л. Перлина. Это вынуждает подробно разобраться в этом вопросе.

Еще раз подчеркнем, что автор считал и считает монографии [10, 11] ценными обобщающими трудами по процессам волочения и прессования. Однако основательное изложение накопленных разными учеными экспериментальных и производственных сведений вовсе не является доказательством того, что и математические теории, разрабо-

[*3] Пункты 1÷5 см. в [1, 2].

танные И. Л. Перлиным и приведенные в этих книгах, также находятся на должной научной высоте. Сделать детальный научный анализ важно не только в связи с публичным заявлением Критика на защите кандидатской диссертации, написанной аспирантом под руководством автора данного цикла статей, но еще и потому, что эти теории часто называют *наиболее обоснованными* [10—13], и именно в этом качестве они попадают даже в учебники по теории ОМД [13, с. 291—297].

Прежде всего надо определиться, что в данном случае следует понимать под термином *допущение*.

Если под допущением понимать неполное соответствие объективной реальности, существующей в природе, то это будет лишь удобным поводом для бесконечных придирок со стороны людей, не очень компетентных в вопросах теории.

По причинам, которые были указаны в предыдущих статьях, можно смело утверждать, что ни одного решения, адекватного природе, нет ни у Коши, ни у Сен-Венана, ни у Хилла, ни у Ильюшина (т. е. подлинно великих ученых). Вообще говоря, и любимый Критиком из-за отсутствия личного опыта математического использования закон Амонтона—Кулона также неверен. И до сих пор никто не знает какой закон контактного трения точно описывает природу.

Как говорил великий математик Анри Пуанкаре, подтверждая свой тезис об условности относительно природы даже чистой математики, "...ну где вы видели в жизни правильный прямоугольный треугольник?! И разве реальная линия может быть бесконечно тонкой, т. е. тоньше атома?". Подытожить это высказывание можно словами философа и математика Бертрана Рассела: "Всякая точная наука основывается на приблизительности".

Поэтому, наверное, применительно к решениям теоретических задач ОМД сформулировать понятие "допущение" и заняться их подсчетом можно лишь относительно общих требований математической теории пластичности. Итак, будем считать допущением: 1) бесспорное искажение рассматриваемого процесса на уровне постановки задачи (например: рассматривается волочение прутка с квадратным поперечным сечением, а принимается, что пруток имеет цилиндрическую форму; или при волочении трубы принимается равным нулю напряжение, действующее со стороны матрицы на стенку трубы, и задача сводится к плоской; или принимается, что контактное трение полностью отсутствует, хотя в действительности оно имеет место); 2) любое несоблюдение или искажение уравнений математической теории пластичности; 3) принятие физических, геометрических и кинематических упрощающих предположений. При сопоставлении разных решений к лучшему или худшему допущению не следует относить использование того или иного закона трения, поскольку предпочтительный учет трения всегда является спорным [14], и его приемлемость просто должна подтверждаться сравнением целевых результатов решения с экспериментальными данными.

При формулировке и подсчетах допущений применительно к решаемым технологическим задачам не следует умничать и непомерно увеличивать их число, принимая незначительно влияющие на конечный результат допущения.

Итак, займемся подсчетом допущений в теории волочения автора и в теории И. Л. Першина. Автором использованы следующие допущения [8, с. 328—335]:

1) материал — идеально жестко-пластический, а упрочнение учитывается средним по очагу деформации напряжением текучести;

2) принимается закон постоянной силы трения;

3) принимается радиальное течение в коническом канале;

4) очаг пластической деформации ограничен концентрическими сферическими поверхностями;

5) вместо условия (47) для выражения частной производной одного напряжения через производную другого по той же координате, т. е. для получения равенства (59), используется упрощенное условие пластичности.

Конечно, автору ничего не стоило убрать допущения 3 и 4 и основательно описать неравномерность деформированного состояния. Для этого было бы достаточно использовать полученные в работах [15, с. 500—530; 16], математические выражения, в которых для определения произвольных постоянных следовало сформулировать граничные условия не на выходе из очага деформации, а на входе в очаг, учитывая известную разницу между выдавливанием и волочением. Однако применительно к малонагруженному и стационарному процессу волочения автор просто не счел целесообразным значительно усложнять окончательные расчетные формулы.

Таким образом, в решении автора для волочения применены 5 допущений и при этом использованы и удовлетворены все 12 уравнений осесимметричной теории пластического течения в сферических координатах.

В решении И. Л. Перлина использованы следующие допущения [10, с. 35, 184, 185]:

1) материал — идеально жестко-пластический, а упрочнение учитывается средним по очагу деформации напряжением текучести;

2) принимается закон трения Амонтона—Кулона;

3) коэффициент трения f не зависит от обусловленного трением повышения температуры;

4) коэффициент трения f не зависит от скорости скольжения;

5) коэффициент трения f не зависит от величины контактного давления;

6) коэффициент трения f не меняется по длине контактной поверхности;

7) очаг пластической деформации ограничен концентрическими сферическими поверхностями;

8) используется упрощенное условие пластичности;

9÷20) не соблюдается ни одно из 12 уравнений осесимметричной задачи математической теории пластичности;

21) радиальные и осевые напряжения остаются одинаковыми для любого радиального направления, выделенного методом тонких сечений элемента, ограниченного концентрическими сферическими поверхностями;

22) для учета сил трения в калибрующей зоне волоки реальный угол α конусности волоки заменяется на меньший условный угол $\alpha_п$, определяемый с учетом длины калибрующей зоны (рис. 5, *а*);

23) направления главных напряжений на поверхности контакта заготовки с волокой совпадают с направлением полных напряжений $\sigma_п$ на этой поверхности, определяемым векторной суммой нормального напряжения σ_φ и касательного напряжения трения $\tau_{\rho\varphi} = \tau_к$;

24) главное напряжение $\sigma_г$, сопряженное с $\sigma_п$, определяется простым проектированием контактной поверхности на поверхность главной площадки;

25) для определения напряжения волочения q главные радиальные напряжения $\sigma_р$, действующие на поверхности выходного шарового сегмента, имеющего площадь $S_{шс}$, умножаются на отношение $S_{шс}/S$, где S — площадь поперечного сечения выходного канала, т. е. принимается, что $q = (S_{шс}/S)\sigma_р$.

Сравнение чисел допущений, принятых автором (5 допущений) и И. Л. Першиным (25), и поставленный между ними Критиком знак равенства как нельзя лучше характеризуют его научную честность. Особенно, если учесть, что допущения 21 и 22 искажают рассматриваемый процесс на уровне постановки задачи, а допущения 23—25 являются грубыми научными ошибками, поскольку правильная математическая трактовка рассматриваемых в них положений получена О. Коши еще в 1822 г. и с тех пор приводится в любом учебнике по курсу сопротивления материалов, не говоря уже о книгах по теории упругости или пластичности.

По поводу допущения 21 следует указать, что одинаковость радиальных и осевых напряжений для любого радиального направления противоречит как известным опытам П. И. Минина и др. по исследованию волочения методом координатных сеток [10, с. 37, 184], так и результатам точного решения В. В. Соколовского [17, с. 483, формулы (15.29)]. Отметив это противоречие, И. Л. Перлин тем не менее приводит такое псевдообоснование: "...однако осесимметричность деформационной зоны позволяет использовать для расчетных целей такое допущение". На самом деле ссылка на осесимметричность некорректна, так как, например, в осесимметричных задачах осадки [см. формулы (67) и (68)] прямого, обратного и радиального выдавливания [15], а также открытой прошивки [8], осевые и радиальные напряжения значительно изменяются во всех направлениях, т. е. осесимметричность никак не связана с постоянством напряжений. Кроме того, аналогично сделанному выше применительно к решению Е. П. Унксова кинематическому анализу, можно показать, что при допущении 21 не удастся удовлетворить граничному условию равенства нулю на поверхности волоки нормальной к ней скорости v_φ течения.

Допущение 22, названное И. Л. Перлиным методом приведенного угла, в принципе противоречит физическому смыслу и может давать приемлемые результаты лишь случайно. Для доказательства этого представим, что угол конусности волоки, например $\alpha = 10°$, несколько больше оптимального угла, при котором напряжение волочения минимально, например $\alpha_{опт} = 6°$. После учета по методу И. Л. Перлина длины калибрующей зоны (например $l = 3$ мм) получим $\alpha_п = 8°$, т. е. приблизимся к оптимальному углу с соответствующим уменьшением напряжения волочения, а при $l = 5$ мм даже получим $\alpha_п = 6° = \alpha_{опт}$, т. е. минимальное напряжение волочения. Таким образом, по методу приведенного угла расчетное напряжение волочения с увеличением длины l калибрующей зоны может уменьшаться, в то время как в действительности любое увеличение этой длины может привести лишь к увеличению напряжения волочения.

В соответствии с допущением 23 в решении принимается, что направления главных напряжений вблизи поверхности контакта заготовки с волокой совпадают с направлением полных напряжений $\sigma_п$ на этой поверхности, т. е. принимается, что угол γ, устанавливающий положение главной площадки (на рис. 5, *а* показана тонкой штриховой линией), определяется формулой

$$\mathrm{tg}\gamma = \frac{\tau_{\varphi\rho}}{|\sigma_\varphi|}. \qquad (91)$$

Это принципиально неверно, так как направления главных напряжений зависят не только от напряжений σ_φ и $\tau_{\varphi\rho}$ в рассматриваемой площадке, но

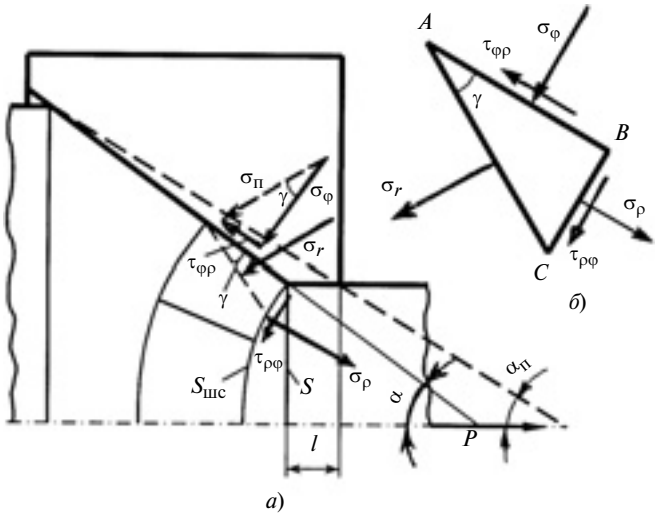


Рис. 5. Расчетная схема И. Л. Перлина (*а*) и схема напряженного состояния на поверхностях элементарной призмы (*б*) при волочении прутка

в равной степени и от напряжений σ_ρ и $\tau_{\rho\varphi}$ в перпендикулярной площадке, которые не учитывает И. Л. Перлин. Известная точная формула для определения направления главных напряжений имеет вид [4, с. 174; 18, с. 37; 19, с. 51]:

$$\mathrm{tg}2\gamma_0 = \frac{2\tau_{\varphi\rho}}{\sigma_\rho - \sigma_\varphi}. \qquad (92)$$

Так как при волочении выражения (91) и (92) определяют малые углы (с учетом принятого И. Л. Перлиным закона трения Амонтона—Кулона $\tau_{\varphi\rho} = f|\sigma_\varphi|$, следовательно, $\mathrm{tg}\gamma = \mathrm{tg}f$; при $f = 0{,}1$ угол $\gamma = 5{,}7°$), то с достаточной точностью можно заменить тангенсы на сами углы, т. е. представить выражения (91) и (92) в виде:

$$\gamma = \frac{\tau_{\varphi\rho}}{|\sigma_\varphi|}; \qquad (93)$$

$$\gamma_0 = \frac{\tau_{\varphi\rho}}{\sigma_\rho - \sigma_\varphi}. \qquad (94)$$

Для наглядного сопоставления выражений (93) и (94) с учетом упрощенного условия пластичности [10, с. 184]

$$\sigma_\rho - \sigma_\varphi = \sigma_s \qquad (95)$$

их можно переписать в следующем виде:

$$\gamma = \frac{\tau_{\varphi\rho}}{\sigma_s - \sigma_\rho}; \qquad (96)$$

$$\gamma_0 = \frac{\tau_{\varphi\rho}}{\sigma_s}. \qquad (97)$$

Тогда

$$\frac{\gamma}{\gamma_0} = \frac{\sigma_s}{\sigma_s - \sigma_\rho}. \qquad (98)$$

Таким образом, расхождение между углом γ, устанавливающим положение главной площадки по И. Л. Перлину, и точным углом γ_0, определяется формулой

$$\delta = \left(\frac{\gamma - \gamma_0}{\gamma_0}\right)100 = \left(\frac{\gamma}{\gamma_0} - 1\right)100 =$$

$$= \left(\frac{\sigma_s}{\sigma_s - \sigma_\rho} - 1\right)100,\ \%. \qquad (99)$$

В книге [10, с. 106] приведены эксперименты по волочению прутков, в которых $\sigma_\rho = (0{,}65 \div 0{,}73)\sigma_s$. По формуле (99) наименьшая ошибка (при $\sigma_\rho = 0{,}65\sigma_s$) составляет $\delta = 200$ %. В работе [20] для обеспечения устойчивого процесса волочения при наименьшем числе проходов рекомендуется выбирать напряжение волочения с учетом коэффициента запаса прочности из условия $\sigma_\rho = (0{,}85 \div 0{,}90)\sigma_s$. При этих значениях ошибка в определении И. Л. Перлиным угла главной площадки $\delta = 570 \div 900$ %. Как говорится, комментарии излишни.

При переходе от площадки *AB* на контактной поверхности (рис. 5, *б*) к главной площадке *AC* в соответствии с допущением 24 И. Л. Перлин определяет главное напряжение $\sigma_г$ в последней путем простого проектирования поверхностей:

$$\sigma_г = -\frac{\sqrt{\sigma_\varphi^2 + \tau_{\varphi\rho}^2}}{\cos\gamma}, \qquad (100)$$

т. е. и тут не учитывается влияние напряжений в площадке *BC*.

Между тем общеизвестная формула имеет вид [4, с. 175; 18, с. 41; 19, с. 52]:

$$\sigma_{г0} = \frac{\sigma_\rho + \sigma_\varphi}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_\rho - \sigma_\varphi)^2 + 4\tau_{\varphi\rho}^2}. \qquad (101)$$

С учетом равенства (95) формулы (100) и (101) можно переписать в виде:

$$\sigma_г = -\frac{\sqrt{(\sigma_s - \sigma_\rho)^2 + \tau_{\varphi\rho}^2}}{\cos\gamma}; \qquad (102)$$

$$\sigma_{г0} = \frac{2\sigma_\rho - \sigma_s}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{\sigma_s^2 + 4\tau_{\varphi\rho}^2}. \qquad (103)$$

При $\sigma_\rho = 0{,}9\sigma_s$ и $\tau_{\varphi\rho} = 0{,}1\sigma_s$ по формулам (102) и (103) получим: $\sigma_г = -0{,}14\sigma_s$; $\sigma_{г0} = -0{,}1\sigma_s$. Таким

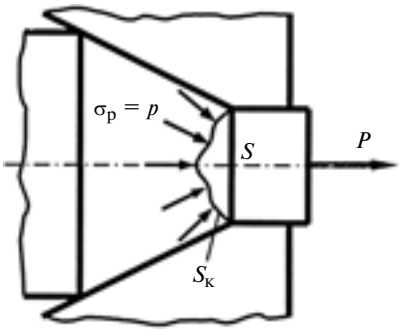


Рис. 6. Схема для установления связи между продольной силой *P* и напряжениями постоянной величины, действующими по нормали к криволинейной поверхности

образом, ошибка в определении величины главного напряжения составила

$$\delta = \left(\frac{\sigma_г - \sigma_{г0}}{\sigma_{г0}}\right)100\ \% = 40\ \%.$$

Найдя постоянные по величине главные радиальные напряжения $\sigma_р$ у выхода из деформационной зоны, т. е. на поверхности шарового сегмента $S_{шс}$, И. Л. Перлин в соответствии с допущением 25 указывает, что "...при этом следует иметь в виду, что $\sigma_р$ не является напряжением волочения, так как на разных расстояниях от оси канала оно имеет разные направления, не совпадающие с осью канала". Далее И. Л. Перлин после ряда ошибочных рассуждений при проектировании этих напряжений на горизонтальное направление получает, что среднее напряжение волочения $q = (S_{шс}/S)\sigma_р$. Показательно, что автор учебника по теории ОМД Н. П. Громов умалчивает об этих рассуждениях И. Л. Перлина, поскольку не может их объяснить студентам [13, с. 297]. Дело в том, что здесь имеет место грубая научная ошибка: общеизвестна теорема о том (см., например, учебник [3, с. 174]), что если нормальное напряжение, действующее на какую-либо криволинейную поверхность (рис. 6) (совершенно неважно, какую форму и площадь $S_к$ имеет эта криволинейная поверхность, а также симметрична ли она), постоянно по величине ($\sigma_р = p$), то создаваемая этим напряжением сила в направлении какой-либо плоскости равна произведению этого напряжения на площадь проекции рассматриваемой поверхности на данную плоскость, т. е. и при сферической, и при клотоидальной, и при синусоидальной криволинейной поверхности упомянутая сила независимо от формы и площади этой поверхности будет одной и той же: $P = \sigma_р S = pS$. И в нашем случае сила волочения $P = \sigma_р S$, т. е. напряжение волочения $q = \sigma_р$. Таким образом, в решении И. Л. Перлина результат ошибочно завышен его умножением на коэффициент $S_{шс}/S$.

Перечисленные грубые научные ошибки являются для И. Л. Перлина систематическими, поскольку полностью повторены и при анализе процессов прессования [11, с. 296—303].

С учетом разобранных ошибок формулы И. Л. Перлина для волочения и прессования нельзя не только считать наиболее обоснованными, но и вообще признать теоретическими (ведь невозможно считать теоретической формулу, при выводе которой использованы ошибочные арифметические выражения типа 1 × 5 = 6). Формулы И. Л. Перлина можно назвать лишь феноменологическими, т. е. сконструированными из определенных соображений с целью описания наблюдаемых опытных закономерностей.

И. Л. Перлин считает, что "реальность всякой формулы определяется в первую очередь результатами ее математического анализа" [10, с. 200]. С этим утверждением нельзя согласиться, поскольку реальность всякой физической, механической или иной прикладной формулы определяется в первую очередь результатами ее экспериментальной проверки, а вовсе не математическим анализом, который может быть весьма далек от действительности, а то и вовсе иметь отношение не к математике, а к целенаправленным словесным подтасовываниям. Вот, например, как И. Л. Перлин, столкнувшись с резким несоответствием оптимальных углов волоки, определяемых по его формуле, с экспериментальными значениями, объясняет это несоответствие в ходе своего "математического анализа" [10, с. 208]: "Некоторое увеличение оптимальных углов по сравнению с экспериментом объясняется тем, что рассматриваемая формула не учитывает некоторой обязательной несоосности заготовки и волочильного канала и влияния отгона смазочного материала. Оба эти фактора с уменьшением угла α уменьшаются и понижают соответственно напряжения волочения" ("некоторым увеличением" И. Л. Перлин скромно называет 5-кратное несоответствие!). Между тем очевидно, что "оба эти фактора с уменьшением угла α", меньшим оптимального, продолжат уменьшаться, но напряжение волочения вопреки рассуждениям И. Л. Перлина начнет почему-то расти. Кроме того, теория И. Л. Перлина как раз и построена в предположении идеальной соосности и идеального распределения смазочного материала, поэтому в наиболее близком к этим условиям диапазоне малых углов и следует ожидать полного триумфа этой теории. Но вместо триумфа получается 5-кратное превышение. И есть большая уверенность в том, что если

провести эксперименты с исключительно высокой соосностью, то экспериментальные значения оптимальных углов заметно не изменятся, поскольку эти углы обусловлены вовсе не микроскопической несоосностью заготовки и волоки в самоцентрирующем процессе волочения, а совсем иными причинами.

С несомненным приоритетом эксперимента в оценке реальности теоретической формулы полностью согласны даже выдающиеся академические теоретики: "полученные из теории факты должны быть подвергнуты экспериментальной проверке" [21, с. 57]; "именно опыт покажет неприменимость того или иного решения, укажет целесообразность замены его каким-то иным" [22, с. 28]; "математические исследования при отсутствии точных данных экспериментов носят академический характер; чтобы исследовать точные диапазоны применимости теоретических зависимостей, желательны многочисленные дополнительные эксперименты" [6, с. 12, 46]; "результаты теории должны согласовываться с опытными данными" [23, с. 45]; "во всех случаях точность теоретических расчетов должна быть проверена экспериментально; именно сравнение с экспериментом показывает, что их точность вполне достаточна для практического использования" [24, с. 19]; "выбор того или иного решения должен быть основан на экспериментальных результатах" [17, с. 266]; "для оценки теоретической погрешности желательно накопление экспериментальных данных" [25, с. 133].

Итак, вместо подтверждения точности выведенной формулы путем сопоставления получаемых по ней результатов с экспериментальными данными, в работе [10] проводится малополезный общий анализ влияния отдельных членов формулы на увеличение или уменьшение напряжения волочения, создающий только видимость проверки. Ведь очевидно, что влияние того или иного члена формулы на изменение напряжения в нужном направлении вовсе не гарантирует ее надежности, так как получаемые при этом результаты могут быть намного меньше или больше опытных. Например, можно вместо известной формулы кинетической энергии $K = mv^2/2$ предложить какую-нибудь формулу типа $K = 3m^{1,1}v^{2,3}$, а затем с помощью "математического анализа" убеждать читателей, что m и v правильно влияют на изменение кинетической энергии, так как рост массы m увеличивает энергию K, а рост скорости v увеличивает энергию K еще заметнее (как это и делает И. Л. Перлин [10, с. 200—214]). Но экспериментальная проверка сразу выявила бы полную несостоятельность предложенной формулы.

Для непосредственной проверки своей формулы для волочения автор данной статьи взял приведенные в книги [10] результаты 32 экспериментов разных исследователей [8, с. 336, табл. 17.1]. При этом максимальное расхождение составило 11,9 % в сторону запаса, а среднее расхождение равнялось 2 %.

Используя формулу И. Л. Перлина для тех же экспериментов, получим намного большие расхождения с опытными данными: от 29,4 % в сторону недооценки до 26,4 % в сторону переоценки (независимая проверка формулы И. Л. Перлина показала даже расхождения в 37,5÷41,0 % [26, с. 44, табл. 1]). Определенные по формуле И. Л. Перлина оптимальные углы волочения прутков составляют 30° [10, с. 208, табл. 21], в то время как эксперименты дают 5°40′ [10, с. 118, табл. 6], 5—6° [27] или 5—9° [20], т. е. имеет место примерно пятикратная ошибка (δ = 400 %).

Справедливости ради следует привести и результаты, полученные апологетами формул И. Л. Перлина. Например, А. П. Коликов, написавший соответствующий раздел учебника [28], привел характерную таблицу, представленную ниже.

Для достоверности в третьей строке таблицы имеется небольшое расхождение, но в остальных случаях получено практически точное совпадение сравниваемых данных. Однако следует подчеркнуть, что в тексте нигде не указаны источник экспериментальных данных, материал труб, кривая упрочнения, расчетное среднее напряжение текучести, угол волоки, длина калибрующей зоны, коэффициент трения. К тому же найденное напряжение волочения измеряется в килоньютонах (!), т. е. в единицах силы. Уже только перечисленное исключает возможность какой-либо проверки реальности "подтверждения". Но при этом в учебнике [28, с. 547] еще и указано, что расчетное значение напряжения текучести *может определяться* либо

Расчетные и экспериментальные напряжения при безоправочном волочении*

Размеры трубы $D_т \times S_т$, мм		Напряжение, кН	
до волочения	после волочения	по формуле И. Л. Перлина	экспериментальное
47,0×6,0	42,0×6,0	147	146
42,0×2,6	34,0×2,6	77	74
40,0×1,9	35,0×1,9	42	50
38,0×1,7	30,0×1,7	48	53
34,0×2,7	27,0×2,7	68	68
32,0×3,9	26,0×3,9	89	88

* Таблица 13.2 из работы [28, с. 548].

как среднее арифметическое начального и конечного значений, либо как неопределенного вида функционал (значение этого математического объекта, как известно, определяется конкретным видом подынтегральной функции, который в учебнике не оговорен), либо может быть получено методом регрессионного анализа. Что именно из этого туманного перечисления предпочел использовать А. П. Коликов, он не указал. Естественно, что читатель, если только он не обладает способностями прорицательницы Ванги, ни за что не сможет догадаться, каким же конкретным образом вычислялось напряжение текучести неведомого материала при расчетах по формуле И. Л. Перлина для упомянутой таблицы. Читателю также будет очень непросто догадаться, каким удивительным образом при *безоправочном* волочении с таким большим диапазоном варьирования исходных диаметров и толщин труб всегда была обеспечена абсолютная неизменность толщины трубы с точностью до 0,1 мм!

Итак, в данной статье автор детально рассмотрел критические претензии, которые имеют люди, получившие смутное представление о прикладной теории пластичности на основе элементарных учебников по теории ОМД [3, 13], к тем ученым, которые многие годы занимаются непосредственно теорией пластичности, развивая ее и успешно решая с ее помощью сложные конкретные задачи.

Как мудро сказал Карел Чапек: "Есть несколько способов выращивать сады: лучший из них — поручить это дело садовнику".

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Воронцов А. Л.** Теоретическое обеспечение технологической механики. 7. Осесимметричная задача теории пластичности. Часть 1. Состояние вопроса // Вестник машиностроения. 2013. № 9. С. 64—72.
2. **Воронцов А. Л.** Теоретическое обеспечение технологической механики. 7. Осесимметричная задача теории пластичности. Часть 2. Кинематическое и напряженное состояния при осадке цилиндрической заготовки с трением на торцах // Вестник машиностроения. 2013. № 10. С. 59—66.
3. **Сторожев М. В., Попов Е. А.** Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
4. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
5. **Степанский Л. Г.** Расчеты процессов обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1979. 215 с.
6. **Хилл Р.** Математическая теория пластичности. М.: ГИТТЛ, 1956. 407 с.
7. **Воронцов А. Л.** Технологические задачи теории пластичности. Т. 2. М.: Машиностроение, 2006. 397 с.
8. **Воронцов А. Л.** Технологические задачи теории пластичности. Т. 3. М.: Машиностроение, 2006. 475 с.
9. **Воронцов А. Л.** Теоретическое обеспечение технологической механики. 5. Экстремальные принципы и проверка теоретических исследований в механической обработке металлов. Часть 1 // Вестник машиностроения. 2013. № 5. С. 60—66.
10. **Перлин И. Л., Ерманок М. З.** Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 448 с.
11. **Перлин И. Л., Райтбарг Л. Х.** Теория прессования металлов. М.: Металлургия, 1975. 448 с.
12. **Технология** обработки давлением цветных металлов и сплавов / А. В. Зиновьев, А. И. Колпашников, П. И. Полухин и др. М.: Металлургия, 1992. 512 с.
13. **Громов Н. П.** Теория обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1967. 340 с.
14. **Воронцов А. Л.** Теоретическое обеспечение технологической механики. 6. Сопоставление теории пластичности с теорией обработки металлов давлением. Часть 2 // Вестник машиностроения. 2013. № 8. С. 61—65.
15. **Воронцов А. Л.** Теория штамповки выдавливанием. М.: Машиностроение, 2004. 721 с.
16. **Дмитриев А. М., Воронцов А. Л.** Напряженно-деформированное состояние заготовки при выдавливании ступенчатых стержней // Производство проката. 2003. № 6. С. 2—13.
17. **Соколовский В. В.** Теория пластичности. М.: Высшая школа, 1969. 608 с.
18. **Тимошенко С. П., Гудьер Дж.** Теория упругости. М.: Наука, 1979. 560 с.
19. **Степин П. А.** Сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 1979. 312 с.
20. **Обработка** цветных металлов и сплавов давлением / К. Н. Богоявленский, В. В. Жолобов, А. Д. Лангихов, Н. Н. Постников. М.: Металлургиздат, 1973. 471 с.
21. **Ильюшин А. А.** Пластичность. М.-Л.: ГИТТЛ, 1948. 376 с.
22. **Безухов Н. И.** Теория упругости и пластичности. М.: ГИТТЛ. 1953. 420 с.
23. **Прагер В., Ходж Ф. Г.** Теория идеально пластических тел. М.: ИИЛ, 1956. 398 с.
24. **Джонсон У., Меллор П.** Теория пластичности для инженеров. М.: Машиностроение, 1979. 567 с.
25. **Качанов Л. М.** Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
26. **Осадчий В. Я., Малевич Н. А.** Методика расчета напряжения волочения труб на короткой оправке // Информатика и технология: Сб. тр. науч. техн. конф. М.: МГАПИ, 2005. С. 38—49.
27. **Биск М. Б., Греков И. А., Славин В. Б.** Холодная деформация стальных труб. Т. 1. Свердловск: Среднеуральское кн. изд-во. 1976. 231 с.
28. **Технология** и оборудование трубного производства / В. Я. Осадчий, А. С. Вавилин, В. Г. Зимовец, А. П. Коликов. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. 608 с.

УДК 621.983:539.3

С. М. МАНЗУЛИН, Ю. Н. САНКИН, д-р техн. наук (Ульяновский ГТУ), e-mail: yns@ulstu.ru

Учет сложности конфигурации детали при холодной штамповке

Предложен способ определения постоянных времени для заготовки при холодной штамповке, что позволяет назначать оптимальные параметры технологического процесса, исключая брак при изготовлении деталей методом вытяжки.

Ключевые слова: вытяжка, листовая заготовка, постоянные времени, холодная штамповка, четырехэлементная вязкоупругая модель.

The method of determining of workpiece time constants in cold forming is suggested. It allows setting optimal parameters of technological process, ruling out reject in parts manufacturing, using drawing method.

Keywords: drawing, sheet billet, time constants, cold forming, four element viscoelastic model.

При холодной листовой штамповке технологичность, качество и трудоемкость изготовления детали зависят от правильности выбора режимов и оснастки. Технологический режим представляет собой совокупность таких параметров, как скорость удара, размеры оснастки и ее материал. На сегодняшний день нет единых методов технологического расчета [1].

Детали, получаемые холодной листовой штамповкой, могут иметь различные конфигурации. При технологическом расчете деталей сложной конфигурации целесообразно использовать математическую модель. Для учета поведения материала можно применить математическую модель Максвелла (рис. 1), внеся некоторые изменения. За основу возьмем модель тела Максвелла с постоянными времени, которые установлены для данного материала в недеформированном состоянии.

Комплексный модуль для данной модели имеет вид:

$$E(i\omega) = \left(\frac{1}{E} + \frac{1}{i\omega\eta}\right)^{-1},$$

где E — модуль упругости; i — мнимая единица; ω — собственная частота вращения; η — постоянная времени для заготовки.

Внесем в эту модель изменения, учитывающие допустимые погрешности. Для этого исследуем модель на наличие сложных для штамповки участков — двойная кривизна, ребра жесткости, подсечки и др.

Каждый участок будем моделировать, используя тело Максвелла. При соединении двух моделей параллельно получим четырехэлементную вязкоупругую модель (рис. 2), где удлинения каждой составляющей соединенной модели равны, а сила, приложенная к комбинации из отдельных моделей, равна сумме действующих в них сил.

Обозначив комплексные модули моделей и их комбинацию соответственно $E_1(i\omega)$, $E_2(i\omega)$ и $E(i\omega)$, получим:

$$E(i\omega) = 2\frac{F^0}{a^0} = \frac{F_1^0 + F_2^0}{a^0} = E_1(i\omega) + E_2(i\omega) =$$

$$= \left(\frac{1}{E_1} + \frac{1}{i\omega\eta_1}\right)^{-1} + \left(\frac{1}{E_2} + \frac{1}{i\omega\eta_2}\right)^{-1},$$

где F^0 и a^0 — сила, приложенная к заготовке, и ее удлинение; F_1^0 и F_2^0 — силы, приложенные соответственно к первому и второму телам Максвелла; E_1 и E_2 — модули упругости соответственно для первого и второго тела Максвелла, МПа; η_1 и η_2 — постоянные времени.

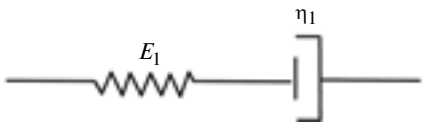


Рис. 1. Модель Максвелла

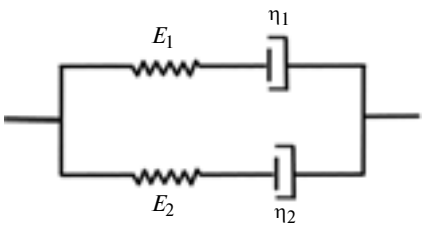


Рис. 2. Четырехэлементная вязкоупругая модель

Рис. 3. Модель детали сложной конфигурации

Тогда

$$E(i\omega) = E_1 + E_2 - \frac{E_1^3}{E_1^2 + \omega^2\eta_1^2} - \frac{E_2^3}{E_2^2 + \omega^2\eta_2^2} + $$
$$+ i\omega\left(\frac{\eta_1 E_1^2}{E_1^2 + \omega^2\eta_1^2} + \frac{\eta_2 E_2^2}{E_2^2 + \omega^2\eta_2^2}\right).$$

Следовательно, комплексный модуль нескольких моделей равен сумме их комплексных модулей [1].

Для n параллельно соединенных тел Максвелла получим выражение [2]

$$E(i\omega) = \sum_{i=1}^{n} E_i - \sum_{i=1}^{n} \frac{E_i^3}{E_i^2 + \omega^2\eta_i^2} + i\omega \sum_{i=1}^{n} \frac{\eta_i E_i^2}{E_i^2 + \omega\eta_i^2}, \quad (1)$$

где E_i — модуль упругости i-го тела Максвелла в комбинации, МПа; η_i — постоянные времени i-го тела Максвелла.

Применим выражение (1) для модели детали, представленной на рис. 3.

Процесс изготовления данных деталей имеет некоторые особенности. При их вытяжке деформация материала в разных местах заготовки различна. Поэтому при их изготовлении по контуру заготовки необходимо обеспечивать разные условия течения металла. При увеличении силы прижатия и затормаживании заготовки увеличивается сопротивление течению металла из-под прижима, что улучшает обтекание металла по форме пуансона и обеспечивает деформирование по всей площади заготовки, уменьшая ее толщину.

В начале вытяжки детали сложной формы пуансон соприкасается с заготовкой только в некоторых местах, остальная ее часть не контактирует с рабочими частями штампа. Эта "свободная" поверхность заготовки при вытяжке под действием тангенциальной силы сжатия принимает гофрированную форму. Тангенциальное сжатие можно уменьшить, значительно увеличив растягивающее напряжение.

Асимметричность и сложная форма детали, а также неравномерность деформаций на разных участках заготовки не позволяют использовать для количественной оценки деформации коэффициенты вытяжки цилиндрических деталей.

Как правило, вытяжка деталей сложной конфигурации из-за высоких требований к качеству поверхности и для предотвращения появления следов от предыдущей вытяжки выполняется за одну операцию.

Так как поверхность детали имеет двойную кривизну, основные исходные данные о поверхности и размерах детали задаются электронной моделью. Остальные параметры задаются на чертеже или эскизе детали (рис. 4). Кроме того, приводится техническая характеристика материала. Например: материал — лист АМЦМ, толщина заготовки 1,8 мм, габаритные размеры заготовки 251,1 × 324,6 мм, максимальная высота вытяжки 48,3 м.

Для получения точной математической модели детали выделим ее сложные элементы. В исследуемой детали имеются сложные элементы трех видов: ребра жесткости, поверхность двойной кривизны, радиусы перехода от ребер жесткости к поверхности двойной кривизны.

Тогда математическая модель будет представлять собой шестиэлементную вязкоупругую модель (рис. 5). Комплексный модуль данной модели имеет вид:

$$E(i\omega) = \frac{F^0}{a^0} = \frac{F_1^0 + F_2^0 + F_3^0}{a^0} =$$
$$= E_1(i\omega) + E_2(i\omega) + E_3(i\omega) = E_1 + E_2 + E_3 -$$
$$- \frac{E_1^3}{E_1^2 + \omega^2\eta_1^2} - \frac{E_2^3}{E_2^2 + \omega^2\eta_2^2} - \frac{E_3^3}{E_3^2 + \omega^2\eta_3^2} +$$
$$+ i\omega\left(\frac{\eta_1 E_1^2}{E_1^2 + \omega\eta_1^2} + \frac{\eta_2 E_2^2}{E_2^2 + \omega\eta_2^2} + \frac{\eta_3 E_3^2}{E_3^2 + \omega\eta_3^2}\right).$$

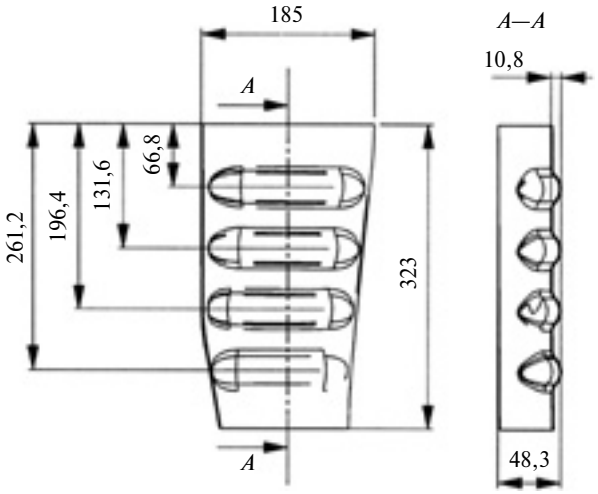


Рис. 4. Основные размеры исследуемой детали

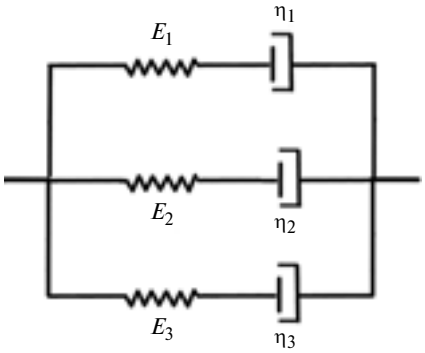


Рис. 5. Шестиэлементная вязкоупругая модель

За комплексный модуль детали принимаем модуль упругости листа из АМЦМ. Рассмотрим взаимодействие заготовки со штампом и молотом МА3147 на примере математической модели (рис. 6).

Техническая характеристика молота

Максимальная масса верхней половины штампа, кг	5000
Размеры подштамповой плиты (стола), мм:	
слева-направо	$3100_{-5,4}$
спереди-назад	$1870_{-3,7}$
Ход бабы, мм	1500^{+25}
Расстояние между направляющими, мм	$3100_{-13,5}$
Частота ударов, мин$^{-1}$, не менее	18
Масса падающих частей без штампа, кг	8810^{+440}
Энергия удара, кДж	63,4 ± 2
Наибольшая скорость бабы, м/с	3
Габаритные размеры молота, мм:	
слева-направо	6200 ± 30
спереди-назад	6560 ± 30
высота	7650 ± 30
Расход воздуха при давлении 0,7 МПа, м^3/мин	$15,4^{+0,8}$
Масса шабота в сборе, кг	83600 ± 5000
Масса молота с шаботом, кг	128680 ± 7800
Удельная масса, т/кДж, не более	0,734
Масса молота в изделии, кг	128376
Материалы деталей молота:	
шток, баба	Сталь 40Х (ГОСТ 4543—88)
поршень	Сталь 45 (ГОСТ 1050—74)
шабот	Чугун СЧ21-40
прокладка	Полиуретан СКУ 7Л (ТУ 38103-133—72)
матрица	Цинк ЦАМ9-1,5 (ГОСТ 21437—95)
пуансон	Свинец Б88 (ГОСТ 1320—74)

Составим расчетную схему (рис. 7), приняв, что во всех частях молота возникают продольные колебания. В фундаменте три сосредоточенные жесткости заменим одной эквивалентной жесткостью. Так как соединения верхней части штампа с бабой и нижней части штампа с шаботом осуществляются фигурным пазом типа "ласточкин хвост", то их взаимодействие моделируем как пружины. Методика расчета контактных деформаций стыков с учетом реальных условий заимствована из работы [3].

Расчетная схема состоит из 13 узлов; участки 5—6 и 10—11 представляют собой стыки; узел 13 — упругое основание, соответствует реакции подкладки из дубовых брусьев. На всех участках имеются продольные колебания. На завершающей стадии удара верхняя часть штампа считается полностью присоединившейся к заготовке.

Используемая для построения АФЧХ перемещений расчетная схема представляет собой систему уравнений [4]:

$$(S_{1,2} - m_1\omega^2)w_1 - T_{1,2}w_2 = -T_{1,2}[w_2];$$

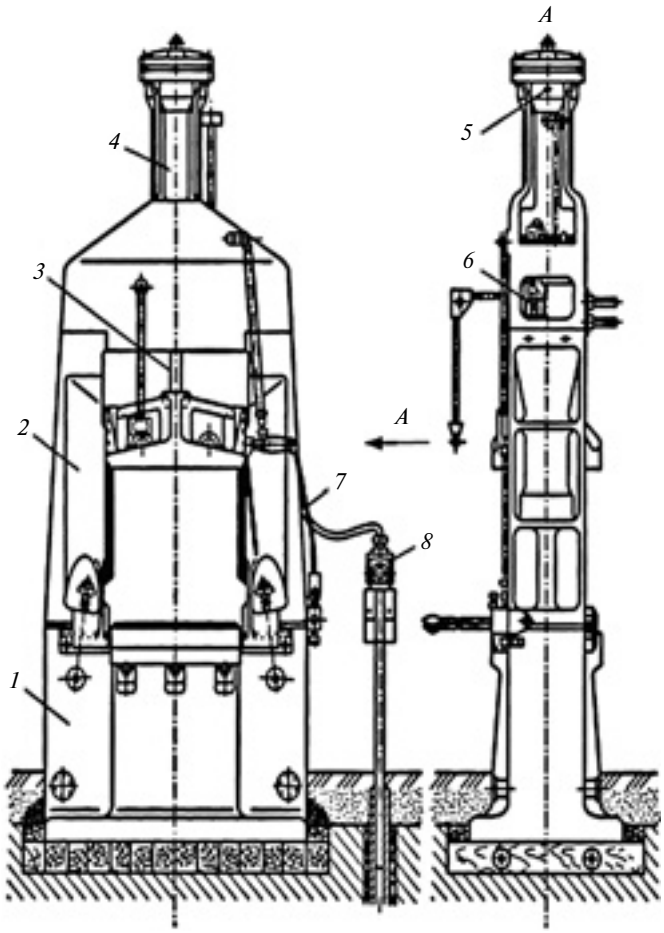


Рис. 6. Чертеж листоштамповочного молота МА3147:
1 — шабот; *2* — станина; *3* — падающие части; *4* — рабочий цилиндр; *5* — предохранительное устройство; *6* — парораспределительный механизм; *7* — механизм управления; *8* — система смазывания

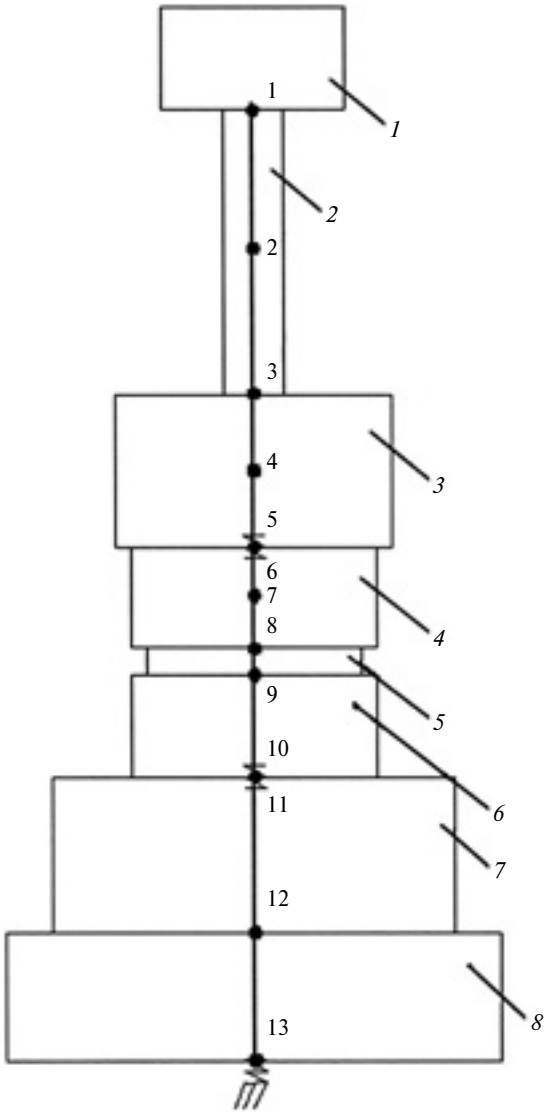


Рис. 7. Расчетная схема молота МА3147:
1 — поршень; *2* — шток; *3* — баба; *4* — свинцовый пуансон; *5* — заготовка; *6* — цинковая матрица; *7* — шабот; *8* — фундамент

$$-T_{1,2}w_1 + (S_{1,2} + S_{2,3})w_2 - T_{2,3}w_3 = \\ = -T_{1,2}[w_1] - T_{2,3}[w_3];$$

$$-T_{2,3}w_2 + (S_{2,3} + S_{3,4})w_3 - T_{3,4}w_4 = \\ = -T_{2,3}[w_2] - T_{3,4}[w_4];$$

$$-T_{3,4}w_3 + (S_{3,4} + S_{4,5})w_4 - T_{4,5}w_5 = \\ = -T_{3,4}[w_3] - T_{4,5}[w_5];$$

$$-T_{4,5}w_4 + (S_{4,5} + C_{5,6})w_5 - C_{5,6}w_6 = -T_{4,5}[w_4];$$

$$-C_{5,6}w_5 + (S_{6,7} + C_{5,6})w_6 - T_{6,7}w_7 = -T_{6,7}[w_7];$$

$$-T_{6,7}w_6 + (S_{6,7} + S_{7,8})w_7 - T_{7,8}w_8 = \\ = -T_{6,7}[w_6] - T_{7,8}[w_8]; \qquad (2)$$

$$-T_{7,8}w_7 + (S_{7,8} + S_{8,9})w_8 - T_{8,9}w_9 = 0;$$

$$-T_{8,9}w_8 + (S_{8,9} + S_{9,10})w_9 - T_{9,10}w_{10} = 0;$$

$$-T_{9,10}w_9 + (S_{9,10} + S_{10,11})w_{10} - T_{10,11}w_{11} = 0;$$

$$-T_{10,11}w_{10} + (S_{10,11} + C_{11,12})w_{11} - C_{11,12}w_{12} = 0;$$

$$-C_{11,12}w_{11} + (S_{12,13} + C_{11,12})w_{12} - T_{12,13}w_{13} = 0;$$

$$-T_{12,13}w_{12} + (S_{12,13} + C_{13})w_{13} = 0,$$

где $w_i(\omega)$ — изображения перемещений в узлах системы; $j_{nk} = (E_{nk}F_{nk})/l_{nk}$ — момент инерции поперечного сечения стержня; $K_{uu} = \cos(\alpha\xi)$; $K_{uN} = \sin(\alpha\xi)/\alpha$; E_{nk} — модуль упругости материала стержня, МПа; F_{nk} — площадь поперечного сечения стержня; l_{nk} — длина стержня; $\xi_{nk} = x_{nk}/C_{nk}$; x_{nk} — координата точки стержня; C_{nk} — жесткость пружины, Н/м; $S_{nk} = j_{nk}\dfrac{K_{ww}(1)}{K_{wN}(1)}$; $T_{nk} = j_{nk}\dfrac{1}{K_{wN}(1)}$; $[N_n] = [u_k]T_{nk}$;

$[N_k] = [u_n]T_{kn}$; $K = \begin{pmatrix} k_{ww} & k_{w\phi} & k_{wN} & k_{w\Theta} \\ k_{\phi w} & k_{\phi\phi} & k_{\phi N} & k_{\phi\Theta} \\ k_{Nw} & k_{N\phi} & k_{NN} & k_{N\Theta} \\ k_{\Theta w} & k_{\Theta\phi} & k_{\Theta N} & K_{\Theta\Theta} \end{pmatrix}$ — матрица переноса, элементы которой даны в работе [4];

$$[w_n] = \frac{l}{EF}\Sigma N_i K_{wN}(1 - \xi_i) + \\ + \frac{l^2}{EF}\Sigma \int_{S_1}^{S_2} f(s)K_{wN}(1 - s)\mathrm{d}s;$$

Таблица 1

Исходные данные

Участок (начало—конец)	l, мм	E, 10^4 кг/мм^2	F, мм^2	μ, кг/мм
1—2	1835	2,10	1767	226,50
2—3				
3—4	530		5 441 425	2500,00
4—5				
5—6	Пружина, жесткость 2300 кг/мм			
6—7	150	1,045	222 681	250,00
7—8				
8—9	50	0,026	300 000	1,26
9—10	Заготовка			
10—11	300	0,160	22 681	1,67
11—12	Пружина, жесткость 5000 кг/мм			
12—13	1710	1,080	6 203 173	48,90
13—14	2650	1,550	36 750 000	13 868,00

$$[w_k] = \frac{l}{EF}\Sigma N_i K_{wN}(\xi_i) +$$

$$+ \frac{l^2}{EF}\Sigma \int_{S_1}^{S_2} f(1 - s) K_{wN}(s) \mathrm{d}s.$$

Систему уравнений (2) решаем методом Гаусса, исходные данные приведены в табл. 1. По уравнениям (2) строят графики перемещений узлов системы, в том числе и перемещения в заготовке. АФЧХ и АЧХ перемещений заготовки показаны на рис. 8, *а* и *б*. Зная начало и конец перемещений стержня, рассчитывают продольные усилия $N_i(\omega)$ [5]:

$$N_2(\omega) = [w_1]T_{1,2} + S_{1,2}w_2 - T_{1,2}w_1;$$

$$N_3(\omega) = [w_4]T_{3,4} + S_{3,4}w_3 - T_{3,4}w_4;$$

$$N_4(\omega) = [w_3]T_{3,4} + S_{3,4}w_4 - T_{3,4}w_3;$$

$$N_5(\omega) = [w_4]T_{4,5} + S_{4,5}w_5 - T_{4,5}w_4;$$

$$N_6(\omega) = [w_7]T_{6,7} + S_{6,7}w_6 - T_{6,7}w_7;$$

$$N_7(\omega) = [w_6]T_{6,7} + S_{6,7}w_7 - T_{6,7}w_6;$$

$$N_8(\omega) = [w_7]T_{7,8} + S_{7,8}w_8 - T_{7,8}w_7;$$

$$N_9(\omega) = [w_8]T_{8,9} + S_{8,9}w_9 - T_{8,9}w_8;$$

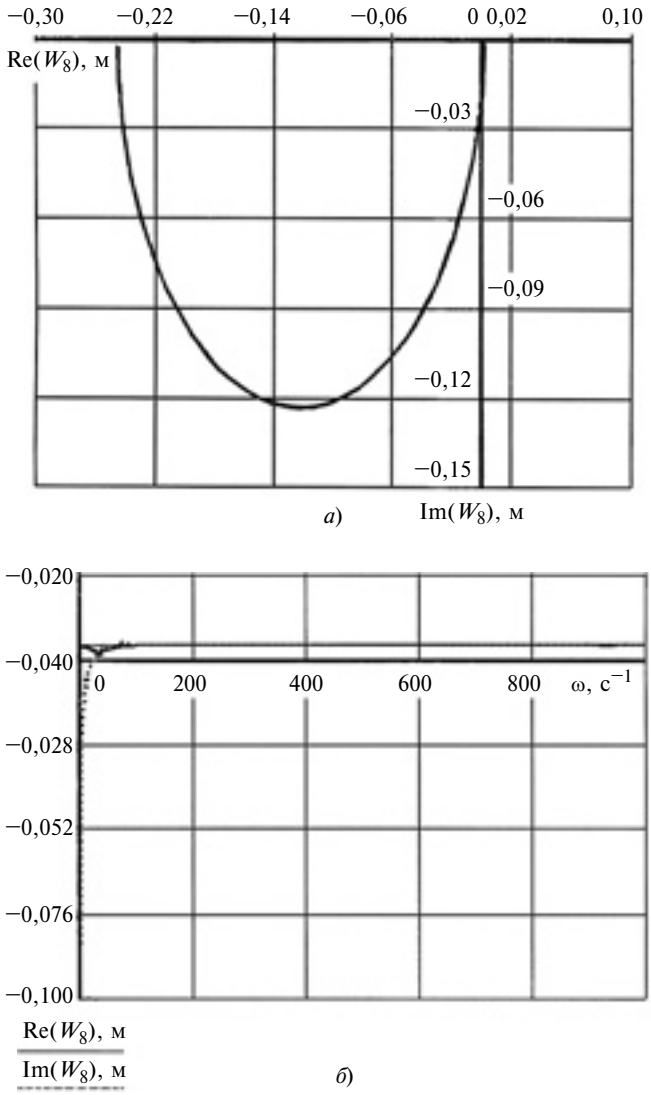
$$N_{10}(\omega) = [w_9]T_{9,10} + S_{9,10}w_{10} - T_{9,10}w_{10};$$

$$N_{11}(\omega) = [w_9]T_{9,10} + S_{9,10}w_{10} - T_{9,10}w;$$

$$N_{12}(\omega) = S_{12,13}w_{12} - T_{12,13}w_{13};$$

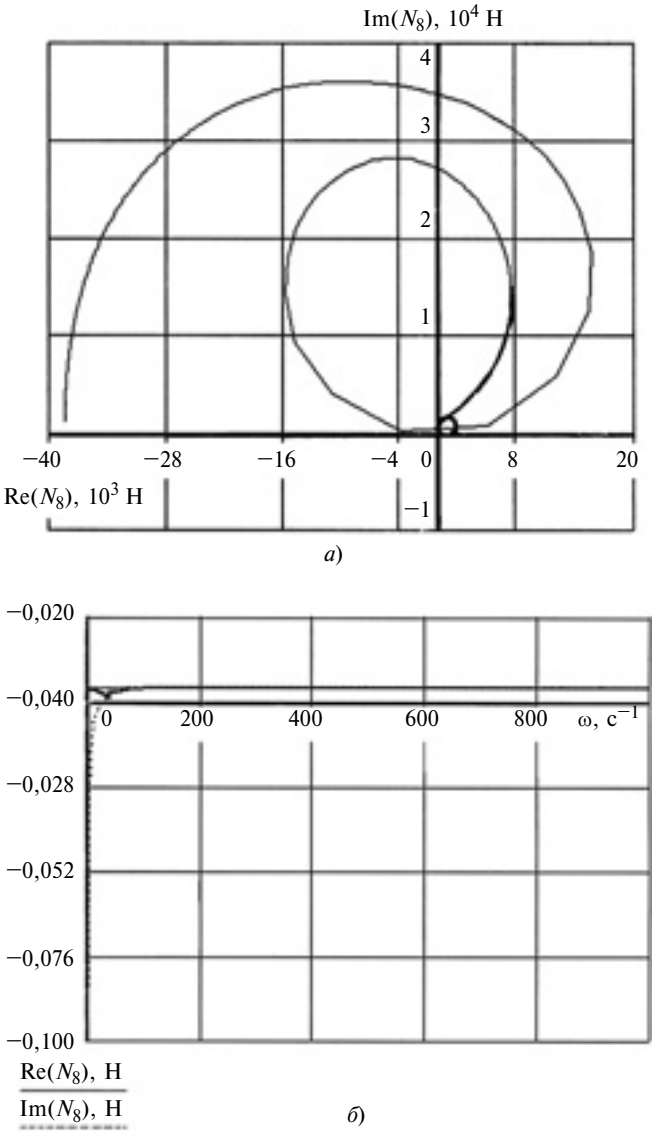
$$N_{13}(\omega) = S_{12,13}w_{13} - T_{12,13}w_{12}.$$

На рис. 9, *а* и *б* представлены АФЧХ и АЧХ продольных усилий в заготовке. Далее получаем



а) *б*)

Рис. 8. АФЧХ (*а*) и АЧХ (*б*) перемещений заготовки



а) *б*)

Рис. 9. АФЧХ (*а*) и АЧХ (*б*) продольных усилий в заготовке

графики перемещений $u(t)$ (рис. 10) и продольных усилий $n(t)$ (рис. 11, *а*) по формулам:

$$u(x,\ t) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\mathrm{Re}(W(\omega)e^{i\omega t})d\omega;$$

$$n(x,\ t) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\infty}\mathrm{Re}(N(\omega)e^{i\omega t})d\omega,$$

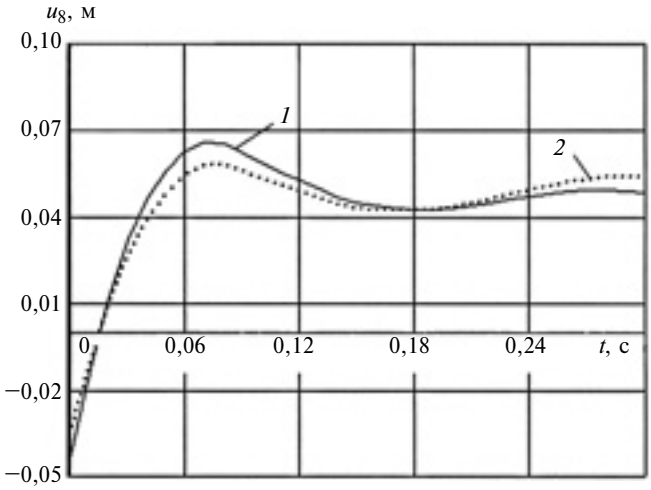


Рис. 10. Теоретический (*1*) и экспериментальный (*2*) графики перемещений

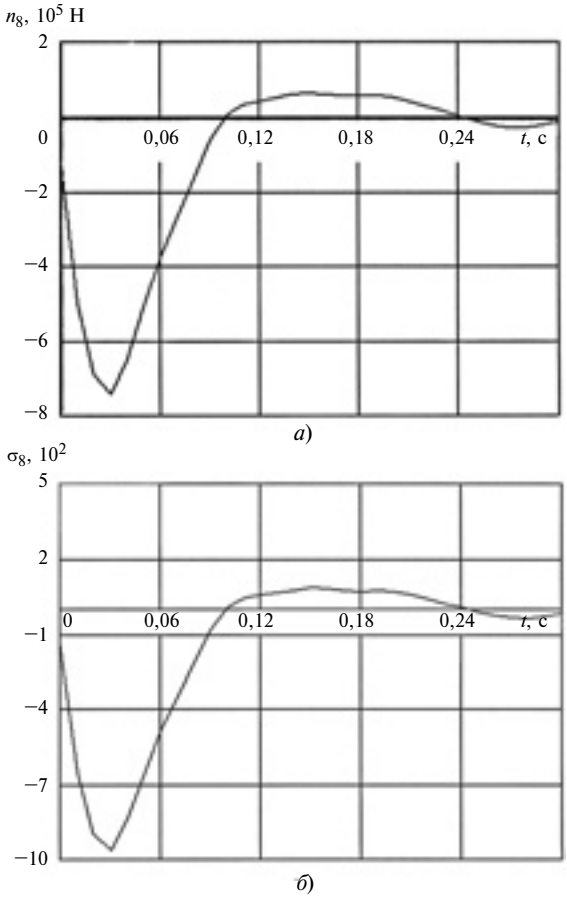


Рис. 11. Графики продольных усилий (*а*) и напряжений (*б*) в заготовке

Таблица 2

Постоянные времени для различных сплавов, вычисленные в MathCAD

Сплав	η_1	η_2	η_3
АМцМ	5145	210	580
Д16АМ	4440	840	2150
ВТ5	3618	1600	2200

где $u(x,\ t)$ — продольное перемещение поперечного сечения; x — координата сечения; t — время; ω — частота вращения.

А также получим график напряжений (рис. 11, *б*) по формуле $\sigma(t) = \dfrac{n(t)}{F}$, где F — площадь заготовки.

По полученному графику можно установить напряжение в любой момент времени. Заметим, что по окончании удара в заготовке напряжения сохраняются. Поэтому деталь после штамповки подвергают термической обработке для снятия остаточных напряжений.

Приведенный на рис. 11 график напряжений получен для конкретного сечения заготовки. Получив графики напряжений для каждого сечения можно по максимальным значениям определить все проблемные участки заготовки. В этих местах при штамповке устанавливают эластичные прокладки, что предотвращает разрушение и исключает брак при изготовлении детали. В табл. 2 представлены постоянные времени для различных сплавов, вычисленные в MathCAD.

Для проверки адекватности предлагаемой методики расчета проведены экспериментальные исследования. Расхождение полученных результатов с расчетными не превысило 10 %, что приемлемо для практического использования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Романовский В. П.** Справочник по холодной штамповке. Л.: Машиностроение, 1979. 520 с.

2. **Бленд Д.** Теория линейной вязкоупругости / Пер. с англ. И. И. Гольберга, Н. И. Малинина; под ред. Э. И. Григолюка. М.: Мир, 1965. 200 с.

3. **Санкин Ю. Н., Юганова Н. А.** Нестационарные колебания стержневых систем при соударении с препятствием / Под общ. ред. Ю. Н. Санкина. Ульяновск: УлГТУ, 2010. 174 с.

4. **Санкин Ю. Н.** Динамические характеристики вязкоупругих систем с распределенными параметрами. Саратов: Изд-во Саратовского ун-та, 1977. 312 с.

5. **Санкин Ю. Н.** Метод конечных элементов в динамике вязкоупругих систем в пространстве преобразований Лапласа // Тр. СВМО. 2006. Т. 8. № 2. С. 22—33.

ОРГАНИЗАЦИЯ И ЭКОНОМИКА ПРОИЗВОДСТВА

УДК 658.001.1

В. Н. ВАСИЛЬЕВ, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана),
e-mail: vnvasi@yandex.ru

Технологическая зависимость экономики, переход машиностроительных предприятий на инновационный путь развития и особенности выхода России из текущей депрессии

Исследована зависимость экономики от производственных технологий в процессе их эволюции. Проанализированы причины отставания экономики России и сформулирован системно-программный подход к постоянному совершенствованию организации производства и управления предприятием.

Ключевые слова: кризис производства, кризис потребления, текущая депрессия.

The relation of economics on manufacturing technologies during its evolution process is investigated. The reasons of lag of the economics of Russia are analyzed, and the system-programmed approach to permanent development of organization of production and plant management is formulated.

Keywords: production crisis, consumption crisis, current depression.

Текущая депрессия, охватившая мировую экономику, по своей глубине и, по-видимому, по продолжительности может сравниться с так называемой Великой депрессией 1929—1933 гг., которая фактически закончилась с началом Второй мировой войны в 1939 г., подъем экономики тогда начался с роста производства вооружений. Великая и текущая депрессии различаются тем, что первая была вызвана кризисом *перепроизводства*, а вторая — кризисом *перепотребления*. Затем в обоих случаях начался финансовый кризис. Великая депрессия была вызвана кризисом свободного рынка, а текущая — кризисом зарегулированного рынка. Великая депрессия не затронула советскую экономику, которая в то время на удивление всего мира успешно выполняла пятилетку индустриализации, но тогда советская экономика не являлась частью мирового рынка. В текущую депрессию экономика России погрузилась полностью, хотя еще не стала совсем рыночной.

Стержнем рыночной экономики являются частная собственность, конкуренция и свобода контракта. В России создана рыночная инфраструктура, но сравнительно большая часть общества не уважает право частной собственности, имеет место незащищенность права собственности, не принят закон о частной собственности на землю; конкуренция еще не стала движущей силой развития как в экономике, так и в политике; свобода контракта хоть и закреплена в Гражданском кодексе РФ, но весьма значительно ограничена подзаконными актами. Не став фактически рыночной, российская экономика подверглась всем отрицательным воздействиям кризиса рыночной экономики, что более всего осложняет выход России из текущей депрессии. Главное различие двух депрессий состоит в значительно возросшей технологической зависимости экономики и в нарастающей в настоящее время глобализации мировой экономики. Это связано с ускорением научно-технического прогресса (НТП), углублением международного разделения труда (МРТ) и с развитием информационных и коммуникативных технологий (ИКТ).

Доставшееся России в наследство "народное хозяйство СССР" осложняет развитие современной российской экономики по многим причинам. Парадокс в том, что как отмечал академик Д. Львов: "Догоняя капитализм (США), мы создали самый лучший в мире научный потенциал, получали золотые медали за образцы новой техники на международных выставках, но налаживать их серийный выпуск мы не могли", т. е. советская экономика оказалась не способной внедрять новейшие технологии в производство. Советские разработки весьма часто реализовывались за рубежом, в то время как планово-распределительная экономика практически исключила участие советских предприятий в МРТ. Что касается развития ИКТ, то всем известно плачевное состояние с телефонизацией в СССР. И только сейчас использование ИКТ начинает бурно развиваться в нашей стране, но, к сожалению, на импортной технике, а не на заимствованных технологиях, хотя бы как в Китае.

Технологическая зависимость экономики сейчас такова, что когда экономика исчерпывает эффективность эксплуатируемых ею технологий, а очередные новые технологии не успевают вывести на рынок свою инновационную продукцию, то она впадает в кризис. Выводят экономику из кризиса еще более инновационные технологии, обеспечивающие новый подъем спроса. Новые технологии требуются и для снятия противоречий, которые время от времени обостряются в процессе развития производительных сил. Так было и при смене трудоемких, капиталоемких, наукоемких технологий и будет при смене последних на грядущие высокоинтеллектуальные технологии.

Идеологом организации производства во времена преобладания трудоемких технологий был основоположник американского научного менеджмента Ф. Тейлор (1856—1915 гг.). В основу тейлоризма положена триада: "фрагментация — оптимизация — производительность труда". В советское время тейлоризм как потогонный метод был объявлен неприемлемым для советской организации производства, хотя В. И. Ленин видел в нем много рационального. С отрицанием тейлоризма наши организаторы производства не прошли школу его оптимизации с целью повышения производительности труда.

Великая депрессия подтвердила предвидение К. Маркса, что капитализм похоронит себя сам, создав армию пролетариата. Защитники капитализма бросились его спасать и направили развитие своих стран по пути, который получил название "Запоздалый путь". В основу была положена концепция "потребительского общества", базирующаяся на постоянном росте спроса с расширением возможностей внутреннего рынка. С целью расширения внешних рынков сбыта мир был поделен на высокотехнологичные и заимствующие (догоняющие) страны. Потребительское общество успешно развивалось после Второй мировой войны за счет социальной направленности экономической политики западных стран и социализации производственных отношений. Рабочие-производители стали и активными потребителями. Покупательная способность населения выросла значительно. Вырос и спрос.

Становление капитализма связано с машинизацией ручного труда. Однако внедряемые машины фактически до середины XX в. оставались только "инструментом" в руках рабочих, а технологии в массе своей оставались трудоемкими. Об этом свидетельствует и динамика изменения соотношения физического и умственного труда в промышленности. На начало XX в. это соотношение составляло 4:1, в середине XX в. — 1:1, а к началу XXI в. — 1:3. Только когда ручной труд стал дорогим, что случилось в ходе реализации концепции "потребительского общества", когда стала экономически оправданной замена рабочих машинами-автоматами и роботами, капиталоемкие технологии стали доминировать. Рост объемов производства и производительности труда стала обеспечивать оптимизация производственных процессов, проводимая согласно триаде Г. Форда (1863—1947): "дифференциация — поток — автоматическая линия". Фордизм — это система организации массового производства, которая привела к резкому росту производительности труда и снижению себестоимости продукции. У нас фордизм, как и тейлоризм, стали "синонимами методов эксплуатации рабочих и тормозом роста производительности труда", "усовершенствованием методов эксплуатации трудящихся" (Большая Советская энциклопедия, 1977 г., т. 27, с. 537). И далее: "конвейер применяется в условиях средней общественно-нормальной интенсивности труда и сопровождается облегчением и улучшением его условий" (там же, стр. 538). Отрицание полезности фордизма, его методов социализации труда, стимулирующих рост производительности, повышение качества продукции и снижение издержек — еще одна идеологическая ошибка, приведшая к увеличению нашего отставания в росте производительности труда.

Капиталоемкие технологии, как и трудоемкие, являются технологиями экстенсивного развития экономики. Втягивание в экономику большого количества машин (капитала) и людских ресурсов (труда) привело к значительному росту потерь рабочего времени (согласно высказыванию Маркса законом № 1 в экономике является экономия рабочего времени) и в итоге к обострению противоречия между ростом производительности рабочих машин и ростом производительности труда. Исследования профессора Х. Опитца (Ахенский политехнический институт, Германия) показали, что за первые 50 лет XX в. производительность рабочих машин выросла более чем в 100 раз, а производительность труда — менее чем в 10 раз. Кроме того, автоматические линии, "жесткая" автоматизация с сокращением жизненного цикла продукции (времени нахождения продукции на рынке) — стали играть регрессивную роль. Например, созданный в СССР первый в мире автоматический завод по изготовлению автомобильных поршней (г. Тольятти, 1950 г.) проработал 25 лет. Этим определилось наше отставание в разработке двигателей внутреннего сгорания практически навсегда. Разработанная профессором Г. Шаумяном (МВТУ им. Н. Э. Баумана) теория производительности рабочих машин-автоматов и автоматических линий, в основу которой был положен баланс потерь рабочего времени, удостоенная Сталинской премии в 1947 г.,

не нашла широкого применения в СССР, но использовалась за рубежом. В 60-е годы на заводе Форда в Детройте многопозиционные автоматические линии были разделены на участки по 3—4 позиции (операции) с тем, чтобы уменьшить потери рабочего времени до минимума.

Экстенсивное развитие экономики исчерпало свои возможности. Замена труда капиталом перестала быть мерой оценки внедряемых технологий. Обострилось противоречие: при значительном росте фондовооруженности производства фондоотдача упала практически до нуля. Решение было найдено в переходе на интенсивный путь развития, что стало возможным с развитием и внедрением в производство информационных технологий (ИТ). Это потребовало увеличения расходов на НИР и НИОКР (R & D). Технологии стали наукоемкими.

Переход на наукоемкие технологии не сопровождался глубокой депрессией, как можно было бы ожидать. Своевременное появление и внедрение в производство ИТ дало мощный толчок развитию производительных сил. Этому содействовала компьютеризация производства и жизни людей. К тому же, 60—70 годы XX столетия были годами расцвета экономики потребительского общества, годами высоких спроса и покупательной способности населения. В итоге "западный путь" развития привел к созданию высокотехнологической, эффективной экономики, но, как показал текущий кризис, проиграл в социальной трансформации западного общества, о чем говорят снижение жизненного уровня и усиление социальных конфликтов в этих странах.

Советская экономическая доктрина также оказалась тупиковой. Ее сырьевая зависимость, зародившаяся в застойные 70—80-е годы прошлого столетия, расчет на внешние инвестиции перевел страну из разряда высокотехнологических в разряд заимствующих стран. Это остановило развитие отечественного машиностроения и погубило станкостроение. Политика преимущественного развития производства средств производства в ущерб развитию производства предметов потребления, сыгравшая решающую роль в первые пятилетки — пятилетки индустриализации, в дальнейшем стала тормозом, так как не стимулировала развитие потребительского рынка в стране. Был потерян мощный источник внутренних инвестиций в развитие современной промышленности. Это определило нашу зависимость от внешних инвестиций и сегодня. Суть проблемы в том, что в масштабе всей экономики производство средств производства "не кормит" себя. Вложенные в него инвестиции возвращаются только в результате производства на них предметов потребления и реализации их на потребительском рынке. В трудах К. Маркса встречается меткое выражение: "Удовлетворение потребностей — есть производительная сила". В нашей стране не был создан внутренний потребительский рынок. К тому же выход из текущей депрессии требует роста потребительского спроса. Сейчас же повышая жизненный уровень населения и его покупательную способность, на что направлены усилия нашего правительства, мы удовлетворяем растущий спрос импортом, т. е. помогаем выходу из кризиса не себе, а странам-импортерам.

Интенсификация производства требует интенсификации живого и прошлого труда на каждом рабочем месте, т. е. как можно более полной обработки деталей за одну операцию. В середине XX века такие рабочие машины были созданы. Появились станки с ЧПУ типа "обрабатывающий центр" (ОЦ), затем гибкие производственные модули (ГПМ) и гибкие производственные системы (ГПС). Стали переходить к концепции "централизация обработки, гибкость производства и компьютерная интеграция производства (КИП)". Централизация обработки — это стремление к как можно более полному выполнению обработки деталей за одну операцию на одном станке (ОЦ). Гибкость производства тем выше, чем меньше времени и ресурсов затрачивается на его переналадку. КИП — это объединение всех основных, вспомогательных, обслуживающих и бизнес-процессов в единую систему управления. С ускорением НТП значительно возросли сложность и функциональность изделий. Изделия и производство стали *наукоемкими* [1—6].

Мировые расходы на НИР и НИОКР стали расти, удваиваясь каждые одиннадцать лет. В 1996 г. они составляли 550 млрд долл., в 2007 — 1,1 трлн долл. Примером наукоемкой технологии может служить технология "Ford automotive operation", включающая пять специализированных центров, расположенных в ведущих автомобилестроительных городах мира и связанных спутниковой связью. По этой технологии новый автомобиль создается за 2 года, автомобильный двигатель — за 4 мес. Стоимость проекта составила 6 млрд долл. и окупилась за 2,5 года. Другим примером наукоемкой весьма продвинутой технологии является станкостроительный завод компании "Mazak" в г. Огучи, Япония. Завод, поэтапный пуск которого начали в 1981 г., был назван "Система 21 столетия". В 80-е годы он выпускал 200 станков типа ОЦ в месяц разных типоразмеров и специализации, тогда еще на двух ГПС без их переналадки при общем числе занятых — 200 человек. Высокая производительность труда на этом заводе достигнута в результате сокращения потерь рабочего времени и увеличения его годового фонда с 600—700 до

6500 часов в год. Завод работает в три смены, в праздничные и выходные дни, причем большую часть — в "безлюдном" режиме. Полнолюдной сменой является только дневная, в которой производится установка заготовок на паллеты из расчета их обработки за 50 ч в безлюдном режиме. Производственный цикл изготовления деталей практически равен машинному времени их обработки, а не нескольким месяцам, как при традиционной технологии.

В XX в. произошло значительное сокращение сроков реализации открытий: в 1885÷1919 гг. срок реализации открытий составлял в среднем 37 лет, в 1920÷1944 гг. — 25 лет, в 1945÷1964 гг. — 14 лет, в 1990-х годах — 3-4 года. Это сократило сроки НИР и НИОКР и еще больше увеличило наукоемкость технологий и, следовательно, продукции. Увеличение расходов на науку привело к падению их отдачи. В 1950—1960-е годы отдача мировых затрат на науку составляла один доллар на каждый вложенный доллар, в 1970-е годы затраты лишь возмещались, затем отдача стала меньше затрат. Статистика доходов венчурных проектов показывает, что из десяти только 1-2 проекта дают супердоход, 4-5 реализуются небольшими доходами, а 3-4 проекта вообще не возмещают затрат. Противоречие между потребностью увеличения расходов на науку и снижением отдачи от вложений в НИР и НИОКР решается за счет субсидий из госбюджетов, общественных и частных фондов, что не противоречит правилам ВТО. В общественном сознании есть понимание необходимости увеличения затрат на науку и ускорения реализации достижений науки и техники в целях повышения уровня и качества жизни. С этим связан и наш переход на инновационный путь развития, что безоговорочно признано как главное направление модернизации нашей промышленности. Однако наши расходы на науку и образование весьма далеки от масштабов расходов ведущих стран (10 млрд долл. на науку и 395 млрд на образование у нас и 360 млрд на науку и 680 млрд на образование в США).

Следует исходить из того, что источниками инноваций далеко не всегда являются результаты фундаментальных и прикладных исследований. Весьма часто инновации возникают там, где их не ожидали. Например, источником инноваций является и смена акцентов в развитии производства. В 40—50 гг. прошлого столетия акцент был на росте производительности рабочих машин. В 1990—2000-е гг. — на диверсификации продукции с целью удовлетворения индивидуальных потребностей потребителя и увеличения числа постоянных покупателей, что обеспечивается конкурентным преимуществом, которое стало интегральным показателем успешного производства. Конкуренция по-прежнему остается основным двигателем развития продукции, производства и сбыта. Конкуренция в условиях современного рынка — это не столько борьба компаний за увеличение своей доли рынка и получение приемлемого уровня прибыли, сколько борьба компании внутри себя за создание конкурентного преимущества (продукта), борьба, как говорят англичане, за кошелек потребителя, за то, чтобы он потратил свои деньги, купив вашу продукцию. Рост числа постоянных покупателей определяет успех в этой борьбе. Если раньше производитель знал, что нужно потребителю и навязывал ему массовую продукцию, то теперь потребитель требует индивидуального подхода к удовлетворению своих потребностей. М. Хаммер, автор концепции "Реинженеринг" (редизайн производственных и бизнес-процессов) сформировал правила поведения производителя в отношениях с потребителем: "В бизнесе следует решать не свои проблемы, а проблемы потребителя"; "успех приносит занятие бизнесом ради своих потребителей"; "фокус на конечного потребителя — продавай не ему, а для него". М. Хаммер отмечает, что с увеличением за год числа постоянных покупателей на 10 % прибыль увеличивается на 50—60 % [7].

Изменилась и суть коммерциализации продукции. Если раньше она была связана только с этапом реализации продукции, то теперь задачи коммерциализации должны решаться на всех этапах инновационного цикла. Концепция продукции, принятая на начальных этапах инновационного цикла без учета задач коммерциализации, приведет к тому, что рынок не примет эту продукцию, несмотря на ее инновационность. Решение задач конкурентоспособности и коммерциализации становится источником инноваций. Потребитель нацелен на продуктивные инновации, его не интересуют процессные инновации, которые создают конкурентное преимущество на рынке продукта только этой компании и никакой другой. Главным источником процессных инноваций является современная тенденция использования методов массового производства для выпуска индивидуальной продукции.

Надо отметить, что высокая мобильность малых инновационных компаний обеспечивает более высокую эффективность, чем крупные компании. Например, в США малые инновационные компании на каждый вложенный доллар в НИР и НИОКР создают в 17 раз больше инноваций, чем крупные компании.

Наукоемкие технологии еще далеко не исчерпали свой инновационный потенциал, но его реализация требует значительного наращивания бюджетных расходов на НИР, НИОКР и образование. Это все больше и боль-

ше будет вступать в противоречие с необходимостью увеличивать бюджетные расходы на решение социальных задач. Выход здесь только один — повысить эффективность НИР и НИОКР благодаря росту креативности, интеллекта и профессионализма каждого работника предприятия, что переведет экономику на более высокий уровень технологического развития. Понятно, что следующим этапом развития будут высокоинтеллектуальные технологии. Основными факторами производства станут: знание, творчество и космос, которые придут на смену капитала, труда и земли. Создание высокоинтеллектуальных технологий потребует и более высокого уровня умственных и креативных способностей, таланта и профессионализма как ученых и разработчиков, так и производственников.

Высокоинтеллектуальные технологии должны быть не затратными, как наукоемкие, а высокодоходными. Они должны обеспечивать как рост производства и сбыта без укрупнения организации, при сохранении занятости и в условиях сокращения продолжительности рабочего дня в будущем, так и рост производительности труда при обеспечении качества и снижения издержек. Эффективность экономики в целом надлежит повышать путем увеличения нагрузки на научно-исследовательские коллективы и инженерный корпус. На каждого старшего научного работника, на одного дипломированного инженера должно приходиться 15—20 вузовских бакалавров, техников со средним техническим образованием и высококвалифицированных рабочих в белых халатах, а не наоборот, как было в советские годы. Не все выпускники средних школ должны идти в вузы. В рыночной экономике при подготовке кадров для себя должен участвовать и частный сектор. Крупные компании создают университеты или специализированные одногодичные классы по подготовке рабочих в белых халатах, включая программистов, лаборантов, менеджеров подразделений или обслуживающих служб. Частному сектору несвойственно финансирование фундаментальных наук. Однако НИР и НИОКР — прямая ответственность частного сектора, а государство должно стимулировать эти расходы по достигнутому результату, по уровню радикальности продуктовых инноваций. Финансирование фундаментальных наук, как и стимулирование частных НИР и НИОКР, может осуществляться за счет доходов тех, кто не производит вновь добавленную стоимость (NVA). Только 12÷15 % мировых финансовых потоков идет в реальный сектор экономики, а остальные — в спекуляцию или в руки тех, кто не производит NVA.

Главным направлением повышения эффективности затрат на фундаментальные науки и прикладные НИР и НИОКР должно быть стимулирование интеллектуального, творческого и креативного труда. Сегодня основные доходы получают производители продукции, а не разработчики и собственники идей, без которых не было бы доходов производителей. В оплате труда всех участников создания, производства и сбыта товаров, обеспечивающих их конкурентное преимущество, включая инвесторов, должен быть найден справедливый баланс с учетом индивидуального вклада каждого. Удивляет разница в оплате труда в сотни раз, например, топ-менеджеров и работников предприятий. В нашей стране нет должного понимания того, что чтобы хорошо зарабатывать, надо хорошо работать. Но чтобы хорошо работали, надо оценивать труд по заслугам, по результату. С переходом на высокоинтеллектуальный креативный труд необходим дифференцированный подход в оценке результатов труда. Творческий труд ученых, собственников идей и их разработчиков должен стимулироваться дифференцированной оплатой за прошлые заслуги по достигнутому результату и включать роялти от коммерциализации и реализации созданных и реализованных на рынке с их участием инноваций. Эффективность науки должна определяться не столько "возвратом на затраты", сколько вкладом результатов НИР и НИОКР во вновь созданный (добавленный) продукт, т. е. вкладом каждого в ВВП страны. Только адресная (бонусная) оценка труда по индивидуальным достижениям, по уровню творчества и интеллекта повысит эффективность НИР, НИОКР и науки вообще. Важным качеством высокоинтеллектуальных технологий должна стать и их социальная направленность. В экономиках стран должен быть найден эффективный (справедливый) баланс бюджетных расходов на науку, образование, здравоохранение и социальную поддержку населения.

Трудно спрогнозировать, если вообще это возможно, когда высокоинтеллектуальные технологии выведут свои радикальные инновации на рынок. Возможно, это будут когнитивные технологии, результатом которых явится создание по-настоящему искусственного интеллекта. Однако время уходит, ускорение НТП нарастает. Ведущие страны обдумывают меры, необходимые для бескризисного перехода к высокоинтеллектуальным технологиям. Российское руководство тоже обеспокоено этим. В России действует Российский фонд фундаментальных исследований (РФФИ), бюджет которого в 2012 г. составил 6 млрд рублей. Подготовлен закон "О фонде перспективных исследований. Национальная безопасность и развитие (НРБ)". Создается в России структура, близкая к американ-

ской DARPA (Defense Advanced Research Project Agency). В. Путин в своих предвыборных статьях высказал мнение, что нам нужен "новый человек". Формировать новую экономику должны образованные и ответственные люди. Нужна новая социальная революция — "образовательная революция", меняющая сам облик российского общества и экономики. "Новый человек — это новый характер труда с высокой долей интеллекта и творчества, новый ментальный уровень" и экономическое мышление. Нет сомнений, что этому программному стратегическому заявлению будут следовать долгие годы. Однако нам необходима срочная трех-пятилетняя программа фактически реиндустриализации промышленности, модернизации всего реального сектора в ходе перехода на инновационный путь развития экономики.

Администрация США уже отреагировала на этот вызов современности. Понимая неизбежность перехода на новый технологический уровень и следуя своей политике быть первыми, приняла двухлетнюю "бонусную программу" с финансированием в размере 120 млрд дол. Задача программы состоит в том, чтобы найти новые "взлетные" технологии и довести продукты их инновации до выхода на рынок. Поиск будет идти по всему миру. Руководители программы полагают, что это позволит США выйти на новый уровень технологического развития, установить новые стандарты и высокую технологическую планку, которая изменит динамику мира, а тем, кто не будет удовлетворять этим стандартам, выход на мировой рынок будет закрыт. Единственным адекватным ответом на американский вызов является восстановление высокого технологического статуса нашей экономики, причем в кратчайший срок (не более пяти лет). Для этого в России есть потенциал и политическая воля. В первую очередь это модернизация нашего машиностроения, его сердцевины — станкостроения, перевод нашей экономики на инновационный путь развития. Путем заимствования необходимо восстановить способность экономики воспринимать достижения науки и техники, а также решить противоречия в развитии современного производства. Основное противоречие состоит в том, что при росте фондовооруженности фондоотдача падает и затраты на НИР и НИОКР не окупаются, так как рабочая машина развивается быстрее, чем производственная система; новые технологии появляются быстрее, чем организация производства успевает перестроиться, и они внедряются в несоответствующих их возможностям условиях. В результате полная отдача от возможностей новых технологий не достигается. **Новые высокие технологии являются интенсивными. Они приходят на смену экстенсивным технологиям, а то, что свойственно экстенсивному развитию, не содействует интенсивному.** Решение указанного противоречия состоит в постоянном совершенствовании организации производства, которая должна быть всегда готова к восприятию новых технологий с полным освоением их возможностей. И более того, организация производства должна стимулировать создание новых технологий.

Наиболее подходящим при переходе на постоянное совершенствование организации производства является системно-программный подход, нацеленный на создание гибкого автоматизированного производства (ГАП) на основе компьютерной интеграции всех основных, вспомогательных, обслуживающих, сбытовых и бизнес-процессов в единую производственно-сбытовую систему. В этом направлении за пятьдесят последних лет многое сделано в технологически высокоразвитых западных странах. Это было заимствовано и Японией, и Южной Кореей, и другими так называемыми новыми индустриальными странами. В России же, заимствуя, многое можно сделать и своими силами, соответствующим образом стимулируя инновации. На рисунке показаны основные программные группы, составляющие системно-программный подход к реализации перехода на постоянное совершенствование организации производства и управления современным предприятием. Системное параллельно-последовательное внедрение этих программных групп приведет к созданию ГАП как единой системы организации и управления предприятием. Эта система будет постоянно совершенствоваться в ходе развития ИКТ. На внешнем рынке уже имеются программные продукты для решения поставленных задач и в будущем будут созданы более развитые, в том числе и силами наших программистов. Это должно значительно сократить сроки модернизации российских предприятий.

Как отмечалось выше, интенсивное производство развивается по триаде: централизация, гибкость и КИП. Генезис гибкого интегрированного производства состоит в переходе от поточного производства через развитие групповой технологии к централизации обработки. Групповая технология [8], как и концепция "Всеобщее управление качеством" (TQM), по опыту западных организаторов производства являются обязательными предпосылками успешного внедрения компьютеризации производства. В основе концепции TQM лежит не констатация брака, а его предупреждение по всему инновационному циклу, а также отказ от ОТК и учреждение службы качества, которая отвечает за реализа-

Составляющие системы постоянного совершенствования организации производства

цию продукции и за отношения с потребителем (создание лояльных постоянных покупателей). Вторым по важности является переход на матричную структуру организации управления производством на основе процессного подхода и принципов реинженеринга, сформулированных М. Хаммером [9]. Матричная структура значительно сокращает количество уровней вертикально-функциональной иерархии и передает полную власть управления ответственным за процесс [10]. Процессный подход на основе реконструирования бизнес-процессов сокращает время производственного цикла, снимает все межфункциональные барьеры, повышает ценность продукции для потребителя и производительность труда, обеспечивает качество и снижение издержек.

Третьей обязательной предпосылкой успешного перехода на постоянное совершенствование организации производства является внедрение концепции "Планирование материальных потребностей" (MRP-I), которая переросла в концепцию "Управление ресурсами и связями предприятия" (ERP-II). В основе этой концепции лежит планирование потребностей производства и его оперативное планирование назад по календарному времени от срока выполнения заказа. Это обеспечивает значительное сокращение запасов и незавершенного производства, повышает эффективность загрузки производственных мощностей и выполнение заказов в срок. ERP-II фактически решает основную задачу организации и управления производством — бесперебойная работа с высоким коэффициентом загрузки оборудования, инструмента, оснастки и людей при минимальных запасах, отходах и затратах. Этим завершается первый обязательный этап. Дальнейшее совершенствование будет идти в ногу с развитием ИКТ. Другие оставшиеся программные группы могут совершенствоваться в любой параллельно-последовательной очередности в зависимости от состояния дел на конкретном предприятии.

В основе группы-подсистемы "Интеграция и автоматизация материальных потоков" лежат следующие принципы:

единство технологического и внутрицехового транспорта;

палетизация, контейнеризация и магазинная подача ориентированных в них заготовок на станки;

интеграция транзитных транспортных и других автоматических складов в единую структуру;

только одноразовая ручная ориентация заготовок, если она требуется, как правило, при разгрузке;

автоматический мониторинг местонахождения любых материальных ценностей, подлежащих перемещениям, в реальном времени.

На конструктивные и технологические параметры этой подсистемы влияют объем выпуска и номенклатура продукции, объем незавершенного производства и запасов, а также конструкция деталей и заготовок и степень интеграции.

Автоматизация и интеграция инструментального хозяйства в единую подсистему начинается с рационализации номенклатуры режущего инструмента на принципах групповой технологии с целью сокращения общего количества потребного инструмента. Широкое применение получает комбинированный инструмент и автоматические регулирующие вылет режущей части на заданный размер державки. Предпосылкой успеха является и установка порядка содержания режущего и измерительного инструмента, и предписание порядка управления инструментальным

хозяйством с учетом требований других подсистем. Основой для этого должен служить анализ потерь рабочего времени по инструменту. Основным критерием оценки является коэффициент использования различных видов инструмента и сокращение издержек по инструменту. Наряду с режущим и измерительным инструментом эта система включает все виды технологической оснастки, оборудование по содержанию и ремонту инструмента, средства доставки групп инструментов и оснастки на рабочие места. Современные инструментальные системы включают автоматизацию распознания и подналадки инструмента. Значительный экономический эффект дает миграция инструмента по рабочим местам (по потребности) с центрального склада вместо его накопления в запасниках операторов.

Особое внимание следует уделять совершенствованию подсистемы "коммерциализация", которая фактически является информационной системой, обеспечивающей связь производителя через рынок с потребителем и обратную связь. Информация, формируемая этой подсистемой, необходима на всех этапах инновационного цикла с целью создания коммерчески стоящего продукта для потребителя с учетом его требований. Коммерциализация охватывает весь комплекс отношений производителя и потребителя, решая проблемы производства посредством решения проблем потребителя.

В связи с возросшей ролью человеческого фактора в развитии производства особое внимание уделяется управлению человеческими ресурсами и гуманизации труда (HRM). Опыт показывает, что успех внедрения новейших технологий, реализация концепции завода будущего — гибкого автоматизированного завода (ГАЗ), формируется в налаженном взаимодействии экономических, организационных и социальных факторов. Развитие управления человеческими ресурсами идет по направлениям расширения фронта работы путем ротации по рабочим местам (уход от монотонной работы и узкой специализации), обогащения работы посредством передачи ответственности за принятые решения сверху вниз, непосредственно на рабочие места и повышения качества рабочей жизни. В связи с этим меняется система подготовки, переподготовки и повышения квалификации персонала. Рост производительности в наше время стал в большей степени определяться расстановкой кадров по рабочим местам в соответствии не только с умственными и физическими характеристиками индивида, но и в большей степени с его физиологическими и психологическими возможностями.

Организация и интеграция информационных потоков связана с эффективностью принимаемых решений и включает в себя средства для фиксации данных и сбора информации, анализа и обработки данных в информацию, передачи информации по установленным потокам на каждый соответствующий уровень принятия решений, хранения и автоматического обновления информации в реальном времени.

Информационная система должна одновременно представлять плановые и фактические показатели в наглядной форме по структурной принадлежности и рабочим местам.

При реализации планов перехода на постоянное совершенствование организации производства придется решать большой объем задач. В условиях значительного отставания нашим предприятиям потребуется мощная господдержка (как финансовая, так и организационная), стимулирующая модернизацию машиностроительных предприятий в кратчайшие сроки. Но и государство, отягощенное решением социальных проблем, не в состоянии оказать полномасштабную финансовую помощь всем предприятиям. Необходим отбор наиболее перспективных в плане модернизации предприятий, который может быть обеспечен путем их ранжирования по инновационному потенциалу и инвестиционной привлекательности [11]. В основе оценки должны использоваться показатели финансовой [12] и факторы технологической устойчивости предприятия [3]. Первые определяют жизнеспособность предприятия на момент аттестации, а вторые — инновационный потенциал, т. е. способность воспринимать достижения науки и техники, успешно осваивать новейшие технологии в будущем [2, 11].

Организационная господдержка подразумевает создание правовых стимулирующих условий для хоздоговорных обязательств между предприятиями и институтами РАН, вузами и научными центрами по разработке программного обеспечения, созданию необходимого оборудования, приборов и рабочих машин для оснащения предприятий-заказчиков. Организационная господдержка нужна и при централизованной закупке необходимых средств за рубежом или создании специальных экономических зон для производства этих средств непосредственно в России (прямые инвестиции).

Организационная господдержка необходима и малым инновационным предприятиям и исследовательским подразделениям вузов для участия в международных специализированных выставках, конференциях и стажировках. Особое внимание со стороны государства должно уделяться малым венчурным компаниям и в создании частно-государственных венчурных фондов, используя для этого отчисления

от уплачиваемых предприятиями налогов — совместные фонды развития (опыт Швеции).

Изложенные подходы перехода отечественного машиностроения на инновационный путь развития необходимо реализовать как среднесрочную стратегию в ближайшие пять лет. Чтобы закрепиться на этих рубежах, следует учитывать и долгосрочную стратегию на последующие десятилетия. В Пан-Европейском сообществе признано, что текущая модель развития — индустриальная модель, базирующаяся на эксплуатации природных ресурсов и человека, — не решает ключевые проблемы развития человечества и должна трансформироваться в новую модель, названную "Зеленая экономика". В контексте этой концепции текущая модель развития привела человечество к неравномерности распределения благ и неравенству. Этому содействовал и главный недостаток рыночного механизма, состоящий в том, что богатые богатеют, а бедные беднеют. Несмотря на социализацию производственных отношений и социальную поддержку малоимущих, социальная напряженность в высокоразвитых странах продолжает расти. Во всех странах имеет место и варварское отношение к природным ресурсам. Это определяет неустойчивость развития мировой экономики. Истощение природных ресурсов продолжается, как и деградация окружающей среды. Борьба с бедностью, безработицей и ростом неравенства не дает надлежащего успеха. Рынок, свободный или регулируемый, не обеспечивает продовольственную, энергетическую и растущую водную безопасность. "Зеленая экономика", "зеленые рабочие места" призваны решить эти и многие другие земные проблемы. Трансформация моделей требует значительного изменения мышления, изменения повседневного поведения производителей и потребителей с учетом удовлетворения потребностей живущего и будущих поколений.

Решение этих общемировых проблем более 20 лет обсуждается в рамках концепции ООН "Устойчивое развитие". В докладе, подготовленном четырнадцатью специализированными агентствами ООН, включая ЮНЕСКО, ПРООН, МОТ, ВОЗ, ЮНИДО и др., к конференции ООН "Рио + 20" (Рио-де-Жанейро, июнь 2012 г.) и представленного на обсуждение нашей Общественной палаты, говорится, что устойчивое развитие — это комплексный подход к решению экологической, социальной и экономической устойчивости [13]. Однако ключевую роль в обеспечении сбалансированного развития решает технологическая устойчивость. Именно технологическая устойчивость предопределяет обеспечение экологической, социальной и экономической устойчивости. Машиностроение и особенно такие отрасли, как энергомашиностроение и станкостроение, создают средства обеспечения указанных в докладе трех устойчивостей. Мир не может избежать природных катаклизмов и изменения климата, но человек может уменьшить их разрушительные последствия и избежать техногенных катастроф. Это возможно, если высокоинтеллектуальные технологии, направленные на решение общемировых проблем в их взаимосвязи, будут получать глобальное распространение.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Борисов С. Р., Васильев В. Н.** Основы предпринимательства и организации производства: Учебное пособие / Под ред. проф. В. Н. Васильева: М.: Машиностроение-1, 2000. 732 с.

2. **Васильев В. Н., Князев Н. С.** Методика расчета рейтингов инновационного потенциала и инвестиционной привлекательности машиностроительных предприятий // Вестник МГТУ. 2011. Специальный вып. С. 157—169.

3. **Васильев В. Н.** Технологическая устойчивость предприятия. Российское предпринимательство. 2006. № 4.

4. **Васильев В. Н.** Подходы в реализации реинжиниринга // Справочник — инженерный журнал. 2007. № 7. С. 42—46; № 8. С. 40—42.

5. **Васильев В. Н., Попкович Т. Г.** Особенности инновационного развития предприятий заготовительных производств в машиностроении // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 6. С. 40—44.

6. **Васильев В. Н., Попкович Т. Г.** Модернизация отечественного машиностроения — ключевая задача реиндустриализации всей промышленности и перевода ее на инновационный путь развития // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 11. С. 38—40.

7. **Hammer M.** "The Agenda: What Every Business Must Do to Dominate the Decade". New York: Random House, Crown Busines, 2001.

8. **Осинцев А. Н., Родионова В. Н.** Современные подходы к организации группового производства // Организатор производства. 2005. № 2. С. 16—19.

9. **Hammer M., Champy J.** Reengineering the Corporation. London: Harper Collins, 1993.

10. **Hammer M.** The Reengineering Revolution — Handbook. London: Harper Collins, 1996.

11. **Князев Н. С., Васильев В. Н.** Ранжирование предприятий машиностроения с целью их инновационного потенциала и инвестиционной привлекательности: Электронное науч. техн. изд. М.: Наука и образование: 2011. 13 с.

12. **Садовская Т. Г., Дадонов В. А., Дроговоз П. А.** Анализ бизнеса. Финансово-хозяйственная деятельность наукоемкого предприятия // Под ред. проф. Т. Г. Садовской М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2005. Ч. 2. 328 с.

13. **От переходного** периода к трансформации: устойчивое и всеобъемлющее развитие в Европе и Центральной Азии // Докл. 14 специализированных агентств ООН Общественной палате, РФ Москва, июнь 2012 г.

УДК378.214.1

Е. Н. ИВАШОВ, д-р техн. наук, В. А. ВАСИН, канд. техн. наук,
С. В. СТЕПАНЧИКОВ, канд. техн. наук (ТУ МИЭМ),
e-mail: ienmiem@mail.ru

Роль изобретательства в техническом прогрессе и профессиональном образовании

Рассматривается значимость изобретательской деятельности в техническом прогрессе и профессиональном образовании, а также механизмы повышения изобретательства в студенческой среде.

Ключевые слова: изобретательство, профессиональное образование, творчество, рационализаторство, потенциал.

The importance of inventive work in technical progress and professional education, and also mechanisms of improvement of inventive activity among students are considered.

Keywords: development of inventions, professional education, creative work, rationalization activity, potential.

Изобретательство — творческий процесс, направленный на новые технические решения и совершенствование технологий. Изобретатели — творческие и целеустремленные люди, благодаря упорству и высокому интеллекту находятся в постоянном поиске новых технических решений, обеспечивая непрерывный прогресс во всех областях деятельности человека.

Большой вклад в историю развития общества внесли великие изобретатели. Не всегда можно проследить последовательность их творческой мысли, так как они редко излагали ход своих рассуждений, однако на сегодняшний день имеются некоторые представления о принципах, на которых основаны их поиски, позволившие сделать гениальные научно-технические открытия [1, 2].

Ярким примером тому является создание самоходной машины. Первый прообраз автомобиля создал крепостной крестьянин Леонтий Шамшуренков (1752 г.). Это была четырехколесная коляска, движение которой осуществлялось мускульной силой двух человек. Следующим этапом стал самоходный экипаж русского инженера, конструктора и изобретателя Ивана Кулибина (1791 г.). Конструкция трехколесного механизма содержала почти все основные узлы будущего автомобиля: коробку скоростей, тормозной механизм, маховое колесо, подшипники качения.

Первый в мире прообраз вертолета — летательный аппарат тяжелее воздуха создал М. В. Ломоносов (1754 г.). Это был механизм с соосными винтами, предназначенный для метеорологических исследований — измерений температуры и давления на разных высотах.

Генератор трехфазного переменного тока разработал М. Доливо-Добровольский. Сегодня 95 % электроэнергии передается и потребляется в виде трехфазного тока.

Первый гусеничный движитель (без механического привода) предложен Д. Загряжским (1837 г.). Он строился на двух колесах, обведенных железной цепью. Затем в 1879 г. русский изобретатель Ф. Блинов получил патент на гусеничный ход для трактора (так называемый паровоз для грунтовых дорог).

Первый в мире самолет создан в 1881 г. в России А. Ф. Можайским, т. е. на 20 лет раньше братьев Райт, которым приписывают это изобретение.

Первым законодательным актом в России, касающемся изобретательной деятельности, стал декрет СНК РСФСР "Положение об изобретениях" (1919 г.). В СССР изобретательство носило плановый характер: разрабатывались перспективные и текущие тематические планы, проводились технические конкурсы, была широко развита система информации в области изобретений и рационализаторских предложений. Особенностью изобретательства в СССР была ее массовость, что положительно влияло на ускорение научно-технического прогресса. Так, в 1924 г. в государственный реестр было внесено 1818 изобретений, за первую пятилетку (1929—1933 гг.) — 19 393 изобретения, за восьмую пятилетку (1966—1970 гг.) — 125 866 изобретений. В СССР массовый характер носила и рационализаторская деятельность. На получение авторского свидетельства об изобретении ежегодно подавалось 150 тыс. заявок. Школьники свои изобретательские способности могли развивать в кружках юных техников и дворцах пионеров. Работы таких выдающихся ученых, как К. З. Циолковский, А. Н. Крылов, А. Н. Туполев, В. Г. Шухов, Е. О. Патон, А. Д. Сахаров, С. В. Лебедев, С. В. Ильюшин, С. П. Королев, Ф. А. Цандер, М. Т. Калашников и многих других, составили золотой фонд изобретений России.

Переход на рыночные отношения в России в начале 90-х годов прошлого столетия существенно изменил условия работы промышленных предприятий. Исчезновение государственной системы планирования заказов, потеря снабженческих и сбытовых связей, свободная конкуренция с импортными товарами вызвали резкий спад производственного сектора, за которым последовал полный развал системы изобретательства в стране. Лишь в 1995 г., когда начали зарождаться первые частные промышленные предприятия, появились заказы на создание новой конкурентоспособной продукции и заявки на оформление патентов на изобретения [3, 4].

Создатели научно-технических достижений (НТД), относящихся к объектам промышленной собственности, регистрируют свои изобретения как полезные модели и получают охранный документ, удостоверяющий их исключительные права на разработку. Это касается только конструктивного выполнения средств производства и предметов потребления и их составных частей.

В настоящее время в России наблюдается повышение активности в изобретательской деятельности и подаче заявок на получение патентов. Получить патент на изобретение в России могут и иностранные граждане. Одно из направлений сотрудничества с зарубежными странами — соглашения об экспорте ноу-хау, инжиниринговых услуг и научных исследований. Россия покупает патентные лицензии, товарные знаки и инжиниринговые услуги и экспортирует технологии химической и нефтехимической промышленности, машиностроения и металлообработки, а также технологии в области геологии и разведки недр. Это области, в которых Россия пока еще удерживает мировые позиции и успешно конкурирует на мировом рынке высоких технологий. И все же имеет место значительное отставание в затратах на технологии в категории патентных лицензий и инжиниринговых услуг (на 12,5 и 250 млн долл. США соответственно) — доход от экспорта составляет 67,4 млн долл. США, а платежи по импорту — 350 млн долл. США.

Россия занимает второе место по коэффициенту технологической зависимости, который определяется как отношение числа иностранных патентных заявок к числу национальных заявок, в РФ он составляет 0,32. В Японии данный коэффициент равен 0,19. По коэффициенту $K_{с.т}$ самообеспеченности технологиями — отношение числа поданных национальных заявок в соответствующие национальные ведомства к общему их числу, Россия занимает второе место ($K_{с.т} = 0,76$) после Японии ($K_{с.т} = 0,84$), в США $K_{с.т} = 0,52$ [5].

Начало нового тысячелетия характеризуется значительными научными достижениями, которые стали определяющими факторами в устойчивом развитии стран. В развитых странах научные достижения, реализованные в технологиях, оборудовании, продукции, дают до 85 % прироста валового внутреннего продукта.

Одним из важнейших показателей научной деятельности в стране является число исследователей, техников и вспомогательного персонала. После распада СССР наблюдается значительное сокращение числа ученых в НИОКР. Сегодня из общего числа принятых сотрудников научные кадры для НИОКР составляют 30 %, а вспомогательный персонал — 62 %. Только 11,2 % выпускников вузов занимаются наукой. Численность исследователей ежегодно сокращается.

Путь к устойчивому экономическому развитию России имеет ряд особенностей: высокий интеллектуальный потенциал и наличие территорий, слабо охваченных хозяйственной деятельностью. Благодаря этому Россия является лидером в переходе к инновационной модели развития общества в целом, и в частности образования.

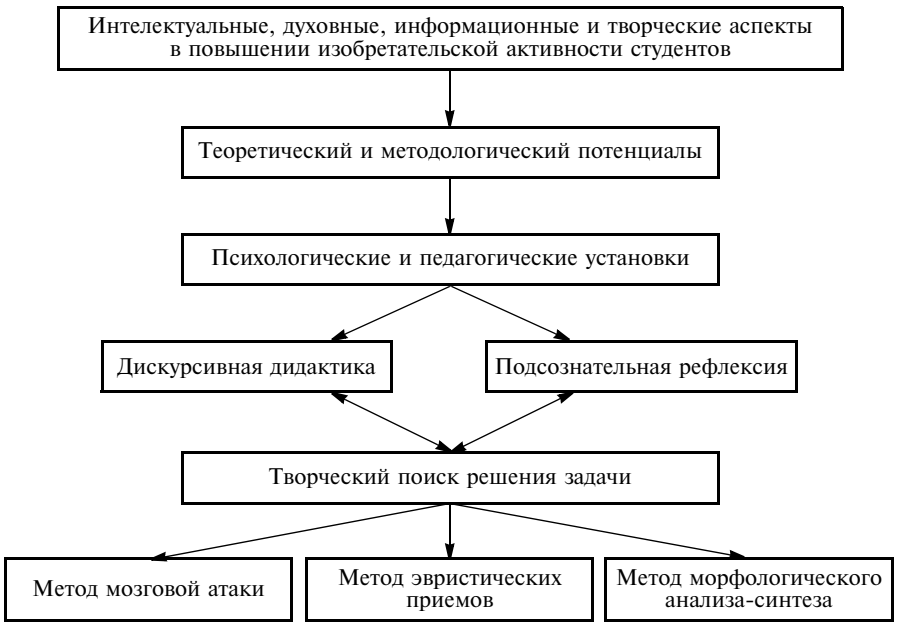
Переход к рыночной экономике изменил ориентиры в системе образования в стране. Социально-экономические изменения в образовании — путь к его эффективному реформированию и устойчивому развитию.

Современный этап развития системы образования характеризуется высокой грамотностью в области информационных технологий. Основная задача высшей школы — формирование интеллектуального потенциала нового поколения [6].

В организации обучающего процесса необходимо учитывать следующие факторы: информационная подготовка, самостоятельное осмысление полученных знаний, навыки в поиске решений поставленных задач. В изобретательской деятельности можно выделить следующие этапы: постановка задачи, ее осмысление, творческий поиск решений с использованием метода мозговой атаки, эвристических приемов и морфологического анализа.

Для повышения творческого потенциала студентов следует привлекать их к исследовательским работам для приобретения навыков инженерного творчества (рисунок). Поэтому курсовые работы и проекты желательно выполнять на уровне изобретений, полезных моделей и промышленных образцов. Стимулом к творческой деятельности может стать оформление соответствующих заявок на получение патентов. Объект интеллектуальной собственности, защищенный патентом или свидетельством Российской Федерации, может стать частью диссертации, работа над которой начинается уже на третьем курсе бакалавриата [7].

Желательно, чтобы студент-выпускник имел печатные работы и принимал участие в научно-технических разработках. Выпускники магистратуры, защитив кандидатскую диссертацию, мо-



Алгоритм изобретательской деятельности в студенческой среде

гут пополнить профессорско-преподавательской состав вуза [8].

Сегодня главным недостатком выпускников технических вузов является отсутствие навыков в самостоятельной постановке задачи и поиске конструкторско-технологических решений. Учебный процесс, как правило, строится на решении задач уже с готовой их постановкой, известен способ и четкий алгоритм их решения, имеются примеры подобных решений и преподавателю известен ответ, а само решение задачи — это рутинная работа, не требующая творческих усилий [9].

Для развития творческих способностей при обучении специалистов необходим индивидуальный подход, следует развивать навыки самостоятельного технического творчества, системного анализа. Творческая активность выпускника вуза — показатель его профессиональной готовности к самостоятельной работе.

Особенность инженерной деятельности заключается в том, что невозможна ее алгоритмизация. А это всегда выход на рубеж неизвестного, что невозможно без системы инженерных знаний. Формирование творческих навыков у студентов осуществляется параллельно обучению по общим и специальным дисциплинам.

К сожалению, сегодня имеет место снижение уровня подготовки абитуриентов. Причиной является не только качество среднего образования, но и общеобразовательные программы по физике и математике. Средствам массовой информации следовало бы больше уделять внимания достижениям науки и техники. Кроме того, изучение специальных дисциплин должно носить прикладной характер. Поэтому в учебном заведении важны межкафедральные сотруднические отношения, т. е. связь естественных наук с общетехническими и профессиональными специализациями.

Важную роль в изобретательской деятельности играет рационализаторство. Участие в рационализаторских и изобретательских работах помогает студентам перейти от репродуктивного мышления к осознанному накоплению знаний при обучении и их творческому осмыслению.

Творческое участие студентов в исследовательских работах может носить факультативный характер и может быть как индивидуальным, так и коллективным. Первое реализуется через курсовые и дипломные проекты на основе наставничества, широко используемого в педагогической практике, второе — через групповые занятия с преподавателем, кружки студенческих научных обществ. Результаты инженерной творческой деятельности студентов могут составить отраслевой фонд технических решений в виде базы данных технических идей, которые в дальнейшем могут быть реализованы и защищены патентами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Педагогический** энциклопедический словарь / М. М. Безруких, В. А. Болотов, Л. С. Глебова и др. Под ред. Б. М. Бим-Бада. М.: Большая российская энциклопедия, 2003. 528 с.

2. **Васильева Е., Малыгина А.** Активность студентов как показатель их социализации и социальной компетенции / Alma mater, № 7, 2007. С. 18—22.

3. **Розин В. М.** Методология: становление и современное состояние. М.: МПСИ,2006. 414 с.

4. **Гуманитаризация** образования в технических вузах / Под ред. Г. С. Арефьевой, В. Л. Басанц, М. М. Гуренко, М. Н. Панфиловой. Люберцы. ПИК ВИНИТИ, 1989. 183 с.

5. **Аблезгова О. В.** Коммерческое использование интеллектуальной собственности в России и зарубежных странах. М.: Дашков и Ко, 2006. 300 с.

6. **Автоматизация** поискового конструирования / Под ред. А. И. Половинкина. М.: Радио и связь, 1981. 334 с.

7. **Системный** подход к формированию активной жизненной позиции учащейся молодежи / И. Б. Фёдоров, А. С. Сигов, С. В. Серебрянников и др. // Междунар. НТК "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения". Ч. 4. М.: МИРЭА, 2007. С. 7—12.

8. **Принципы** реализации методологии формирования активной жизненной позиции учащейся молодежи / А. С. Сигов, А. П. Лучников, С. В. Серебрянников и др. // Междунар. НТК "Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения". Ч. 4. М.: МИРЭА, 2007. С. 50—53.

9. **Половинкин А. И.** Основы инженерного творчества. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.

К. С. КОЛЕСНИКОВ, акад. РАН, В. А. ДУБРОВСКИЙ, канд. техн. наук (ИМАШ им. А. А. Благонравова РАН), email: mashsovet@mail.ru

Достижения РАН в области машиностроения за 2012 год

Объединенный научный совет РАН проанализировал фундаментальные исследования и целевые научно-технические программы в машиностроении за 2012 г. Были отмечены следующие наиболее важные научные достижения и прикладные исследования.

ГНЦ ФГУП "Центр Келдыша" совместно с предприятиями Роскосмоса и Росатома разработал технические решения и конструкцию ядерной энергодвигательной установки (ЯЭДУ) мегаваттного класса на основе газоохлаждаемого реактора и турбомашинной системы для преобразования тепловой энергии в электрическую с перспективой использования в космических системах. Вырабатываемая мощность — 1000 кВт, удельный импульс электроракетных двигателей — 7000 с. По уровню технических параметров ЯЭДУ не имеет зарубежных и отечественных аналогов. Данная разработка положена в основу создания транспортно-энергетического модуля (акад. А. С. Коротеев).

Выполнено эскизное проектирование следующих объектов наземной космической инфраструктуры создаваемого космодрома "Восточный": стартовые комплексы, заправочно-нейтрализационная станция, зоны падения составных частей ракетоносителей, комплексы геодезического и метеорологического обеспечения. Проработаны различные варианты объектов и техническое оборудование. Совместно с ФГУП "ЦНИИТМАШ" решались вопросы газодинамики стартов (чл.-кор. РАН И. В. Бармин, ФГУП "ЦЭНКИ").

Выполнены теоретические оценки ослабления сигналов полупроводникового лазера, осуществляющего передачу управляющих сигналов на борт высокоскоростной ракеты, позволяющие сформулировать требования к мощности дымообразования двигателя малогабаритных управляемых ракет.

Разработан комплекс программ по оценке всепогодности оптических и РЛ-систем наведения для различных климатических зон. В основе программ лежат оригинальные алгоритмы, построенные на данных экспериментальной метеорологии, которые позволяют методом Монте-Карло имитировать оптическую плотность атмосферы при наличии дымок, туманов и осадков. Выполнена оценка чистоты работы оптических и радиолокационных каналов наведения в полной совокупности погодных условий для арктического, умеренного, субтропического и тропического климатов (акад. А. Г. Шипунов, ОАО "КБП").

Разработана технология создания в многослойных функциональных покрытиях подвижных наноструктурных границ в пористых наноструктурных интерфейсах, которые эффективно гасят вибрации, обладают высокими износо-, трещинно- и термоциклической стойкостью, высокими антифрикционными свойствами и усталостной долговечностью, могут применяться в условиях значительных внешних воздействий (акад. В. Е. Панин, ИФПМ СО РАН, ОИВТ РАН).

Завершены исследования и разработка серии вихретоковых приборов: вихретокового дефектоскопа ВД-92НП для неразрушающего контроля труб, прутков, профилей различного сечения изделий металлопроката при изготовлении; дефектоскопа ВД-90НП для обнаружения поверхностных и подповерхностных трещин в деталях из ферромагнитных и немагнитных материалов и сплавов, который можно использовать в полевых условиях и в холодное время года на магистральных трубопроводах, судостроительных и судоремонтных верфях и т. д. Разработаны сканеры для антитеррористической диагностики высокой точности.

Проведены испытания в производственных условиях бесконтактного электромагнитноакустического автоматизированного комплекса A2075 SoNet для контроля трубопроводов с наружной стороны на наличие трещин, расслоений, каверн, язвенной коррозии и других опасных дефектов (акад. В. В. Клюев, НИИ интроскопии МНПО "Спектр").

Создан новый легкий литейный жаропрочный наноструктурированный никелевый сплав с поликристаллической структурой для турбинных лопаток, отличающийся высокими прочностью, пластичностью, долговечностью.

Получен жаропрочный красный рутений с содержанием никелевого сплава ВЖМ8, имеющий повышенную жаропрочность, который можно использовать для изготовления турбинных лопаток с монокристаллической структурой, эксплуатируемых при температуре 1170 °С и с кратковременным повышением до 1200 °С. Отработаны технологии выплавки и литья монокристаллических образцов и термической обработки (акад. Е. Н. Каблов, ФГУП "ВИАМ" ГНЦ РФ).

Созданы технологии: нанесения функциональных вакуумных ионно-плазменных покрытий с учетом кинетики плазменных потоков внутри вакуумной камеры и реакционной способности поверхности обрабатываемой детали; лазерного полирования и

модификации поверхностных слоев деталей с улучшением их микроструктуры; выращивания деталей из титановых и жаропрочных сплавов.

Исследованы покрытия, получаемые в виде композиционных материалов с управляемой структурой и обеспечивающие шумопоглощение. Разработана методология моделирования сборочных производств летательных аппаратов (чл.-кор. РАН О. С. Сироткин, ОАО "НИАТ").

Создан экспериментальный образец многофункционального шагающего робота, способный перемещаться по поверхностям произвольного наклона, включая стены и потолки, и в зависимости от установленного оборудования выполнять контроль, очистку или покраску поверхностей. Стопы робота оснащены вакуумными контактными устройствами, обеспечивающими сцепление с любым материалом. Робот может использоваться в различных высокотемпературных средах (д-р техн. наук В. Г. Градецкий, ФГБУН "ИПМех РАН").

Завершены теоретические и экспериментальные исследования по проектированию движительно-рулевых комплексов типа поворотных винторулевых колонок, в том числе с соосными винтами, а также типа Azipod для крупнотоннажных скоростных судов.

Создан программный комплекс по проектированию гибких ограждений высокоскоростных судов на воздушной подушке, обеспечивающий повышенные безопасность, мореходность и управляемость. Разработана методика проектирования управляемых малогабаритных водометных движителей нового поколения.

Даны рекомендации по конструированию, расчетам и нормированию прочности различных образцов морской техники, ледоколов нового поколения — универсального атомного ледокола и ледоколов проводки, в том числе для мелководья (акад. РАН В. М. Пашин, чл.-кор. РАН А. В. Пустошный, д-р техн. наук О. М. Палий, д-р техн. наук О. Я. Тимофеев, ФГУП "Крыловский государственный научный центр").

Разработаны принципы создания антифрикционного многослойного наноструктурированного покрытия на массивном металлическом теле, состоящего из силового каркаса, который представляет собой слой с высокой шероховатостью и имеет улучшенные физико-механические характеристики, и антифрикционного слоя из наноструктурированного полимерного композиционного материала. Для создания прочного адгезионного сцепления на границе раздела в антифрикционном слое полимерного композита выполняется модифицирование поверхности наполнителя. Пленка фрикционного переноса на поверхности металлического контртела содержит соединения высокой долговечности благодаря возобновляемости в результате химических реакций при трении. Методами рентгено- и Оже-электронной спектроскопии с применением равновесной термодинамики и квантово-химических расчетов исследованы сегрегационные процессы в поверхностных слоях трибосопряжений, что позволило разработать наноструктурные добавки, блокирующие негативные сегрегационные явления в металле контртела, и оптимизировать свойства, концентрационный состав и размеры многослойного наноструктурного покрытия (акад. В. И. Колесников, д-р техн. наук П. Г. Иваночкин, ФГБОУ ВПО РГУПС).

Разработаны термомеханические режимы получения ультрамелкозернистой структуры в новом интерметаллидном сплаве Ti—22Al—20Nb—2V—1Mo—0,25Si на основе орторомбической Ti_2AlNb-фазы с пониженным удельным весом, который характеризуется сверхпластическими свойствами при температурах 750—900 °С.

На примере сплава ВТ6 показана возможность получения наноструктурных титановых листов изотермической прокаткой с использованием технологической схемы, исключающей трудоемкий этап всесторонней изотермической ковки (ФГБУН "ИПСМ РАН").

Исследованы явления вблизи поверхности и в объеме жидкости, находящейся в вибрирующем сосуде. Объяснены и математически описаны процессы появления и измельчения ячеистых структур на поверхности жидкости, возникновения турбулизованного газонасыщенного слоя, фонтанирования, направленного движения пузырьков воздуха и твердых частиц. Предложены пути совершенствования и снижения энергозатрат в вибрационных машинах с самосинхронизирующимися вибровозбудителями. Разработано виброударное устройство для разрушения ледового покрова, асфальтового покрытия и отслуживших железобетонных плит (д-р физ.-мат. наук И. И. Блехман, ИПМаш РАН).

Установлено снижение шероховатости поверхности и упрочнения приповерхностного слоя в результате образования наноструктур при авторезонансном ультразвуковом точении, что обусловливает возможность получения поверхностных слоев заданных свойств подбором режимов обработки (д-р техн. наук В. К. Асташев, ИМАШ РАН).

Разработана эффективная ресурсосберегающая и экологичная технология вакуумно-дуговой очистки внутренней поверхности корпуса буксы железнодорожного вагона (д-р техн. наук В. Г. Кузнецов, ИПМаш РАН, ООО "ФАКТОРИЯ ЛС").

Выполнены работы по усовершенствованию транспортно-дорожного комплекса г. Сочи.

Разработаны принципы функционирования систем дорожных транспортных средств на основе интеллектуального взаимодействия. Разработана методика экспериментальных исследований модели автомобиля с интеллектуальными бортовыми системами (чл-кор. РАН В. М. Приходько, ГТУ МАДИ).

С целью снижения энергозатрат и расхода топлива при работе транспортных машин разработана кинематическая схема механического бесступенчатого трансформатора с колебательным движением внутренних звеньев, имеющего механический накопи-

тель, который позволяет при эксплуатации машины в городском режиме снизить расход энергии на 30 %.

Даны рекомендации по совершенствованию технологии изготовления поковок относительно геометрии слитков, режимов нагревания слитков и заготовок под ковку, схем и режимов ковки, номенклатуры бойков для прессов, что позволило в ООО "МЗ Камасталь" снизить брак до 1,5 % от валового производства поковок.

С целью повышения долговечности элементов фрикциона исследована динамика блокировки гидротрансформатора. Достигнута оптимизация процесса управления, что позволило уменьшить буксование фрикциона блокировки ГТК на 20÷45 % и получить коэффициент динамического момента не выше 2,28 (акад. Э. С. Горкунов, ИМАШ УрО РАН).

Установлено, что сплав 1570 с бимодальной структурой, полученной методом интенсивной пластической деформации, которая состоит из крупных (≈20÷40 мкм) зерен, разделенных тонкими прослойками из зерен микронного размера, имеет высокий коэффициент скоростной чувствительности ($m \approx 0{,}4$), что характерно для сверхпластической деформации алюминиевых сплавов при квазистатическом нагружении. Определена причина данного эффекта — локализация пластического течения по неравновесным границам зерен. Полученные результаты исследований могут быть использованы при разработке сплавов со сверхпластичными свойствами при динамическом нагружении.

Разработано жаростойкое покрытие Ni—Co—Cr—Al с интерметаллидным фазовым составом (β-NiAl + γ-Ni_3Al) и слоистой микроструктурой зерен, используемое в качестве подслоя в составе комбинированного теплозащитного покрытия. Испытания его на жаростойкость методом изотермической выдержки при температуре 850 °С в течение 500 ч показали, что нанесение интерметаллидного покрытия ПНХ20К20Ю13 изменяет механизм высокотемпературного окисления поверхности жаропрочных никелевых сплавов с образованием стабильных оксидов, что повышает жаростойкость. Данное покрытие используется для защиты от высокотемпературной газовой коррозии рабочих лопаток турбин газотурбинных двигателей энергетических установок ГТЭ-35-770-2 и ГТЭ-45-2 в ОАО "Якутэнерго" (НФ ИМАШ РАН).

Исследована пространственная геометрия металлических и кварцевых образцов с пленочными стеклообразными покрытиями, нанесенными термическим разложением карбоксилатов металлов в жидкой фазе. Проведены испытания образцов в смазочной среде и в условиях сухого трения. Определены оптимальные композиции покрытий: для металлических материалов — двухслойные Al—Cu и Zr—Cu, для кварцевых подложек — трехкомпонентные Zr—Li—Nd и Al—Li—Nd (акад. И. Г. Горячева, ИПМех РАН).

Модернизирована такелажная экипировка для такелажных работ по местности со сложным нерегулярным рельефом. Разработана конструкция ног экзоскелета со следящими пневмоприводами, увеличивающими быстродействие. Разработана математическая модель экзоскелета для статических и динамических расчетов конструкции при выборе кинематической структуры и разработке алгоритмов управления на различных режимах его функционирования с использованием датчиков положения (чл.-кор. РАН Н. Н. Болотник, ИПМех РАН).

Исследованы пути оптимизации накопителей энергии, в частности для электромашинных агрегатов с инерционными накопителями (ИЭЭ РАН).

Разработана методология создания блока электромашинных агрегатов вертикального исполнения на базе гидрогенераторных технологий для компенсации реактивной мощности в сетях при отсутствии возможности использования тех же агрегатов для покрытия пиковых мощностей (акад. Ф. Г. Рутберг, ИЭЭ РАН, АО "Электросила", Филиал ОАО "Силовые машины").

Разработан математический аппарат обработки и анализа пульсовой волны в периферийных артериях человека, позволяющий определить истинное значение кровяного давления в аорте человека и показатели упругости сосудов.

Разработан технический проект аппаратно-программного комплекса биохимического мониторинга для неинвазивного получения информации о пульсовых явлениях в магистральных артериях человека на основе апланационной тонометрии и анализа данных, полученных методами нелинейных волновых процессов, что позволяет определить такие клинически верифицированные показатели, как эластичность магистральных сосудов, интенсивность отражения пульсовой волны, корригированное давление в аорте.

Установлено увеличение среднего расхода флюида при колебательных воздействиях на многофазную систему с фазовыми переходами, находящуюся в режиме автоколебаний. (Р. Ф. Ганиев, НЦ НМВТ РАН).

Разработан расчетно-экспериментальный метод проектирования высокоресурсных насосных ступеней электроприводных центробежных насосов на основе теоретико-инвариантного расчета интенсивности изнашивания элементов насоса и математического моделирования процесса изнашивания в пакете Эйлер.

В сотрудничестве со специалистами химического факультета МГУ разработаны технологии нанесения углеродных алмазоподобных покрытий: монокристалл покрытий-ориентантов, легированных вольфрамом, и аморфных углеродных покрытий с повышенным содержанием sp^3-фазы. Испытаниями на возвратно-поступательной машине трения установлены повышенные противоизносные и антифрикционные свойства стальных образцов с данными покрытиями в среде синтетического масла ПАОМ-4. Углеродные покрытия, легированные вольфрамом, значительно улучшают противоизносные и антифрикционные свойства смазанных трибосопряжений в среде с трибоактивными при-

садками (диалкилдитиофосфатом цинка и олеиновой кислотой). Установлено, что в процессе твердофазной обработки сверхвысокомолекулярный полиэтилен приобретает новую структуру, благодаря которой у полимера улучшаются физико-механические показатели, о чем свидетельствуют испытания на растяжение и наноиндентирование. Исследовано влияние структуры прессования СВМП на триботехнические характеристики. Установлена возможность получения СВМПЭ с заданными свойствами изменением режимов механической обработки и термопрессования, применяемых в узлах трения, функционирующих при нестационарных режимах. Трибологические испытания подшипника скольжения показали перспективность применения полимерматричной композиции с наноструктурными квазикристаллами системы AlCuFe.

Обоснована целесообразность применения металлофторопластового материала в многосекционных подпятниках небольшого диаметра, работающих в режиме гидродинамической смазки. Разработаны основы технологии применения металлофторопластового материала при изготовлении отдельных секций и комплектов секций подпятника (д-р техн. наук Ю. Н. Дроздов, ИМАШ РАН).

Разработана методология фрактодиагностики эксплуатационных разрушений ответственных несущих конструкций транспортных, энергетических, технологических объектов инфраструктуры. Специалистами ИМЕТ РАН, ИМАШ РАН, ИПМех РАН, СКТБ "Наука" Сибирского отделения РАН совместно с ЦНИИМАШ, ВНИКТИ, ИрГУПС и МАСИ разработаны новые подходы к фрактодиагностике элементов подвижного состава, отказ которых вызывает тяжелые аварийные и катастрофические ситуации на железнодорожном транспорте (чл.-кор. РАН Н. А. Махутов).

Выполнен анализ особенностей накопления циклических повреждений при нестационарных режимах нагружения с учетом двух определяющих факторов: переменности показателей степени в уравнениях кривых усталости, связывающих амплитуду циклических напряжений и долговечность; увеличения разброса долговечности при снижении амплитуд разрушающих напряжений, которые определяют различную интенсивность накопления повреждений в зависимости от характера нагружения. Определены опасные сочетания режимов, ведущие к ускорению накопления повреждений для технических систем атомной и тепловой энергетики (корпуса реакторов, парогенераторов, трубопроводы). Исследовались закономерности накопления повреждений в наиболее повреждаемых зонах парогенераторов АЭС с реакторами ВВЭР (чл.-кор. РАН Н. А. Махутов, ВНИИАЭС, ИМАШ РАН, ВТИ, НИКИЭТ).

УДК 621.9.06-529.004.69

И. ДЕКЕР, д-р физ. наук (KNUTH Werkzeugmashinen GmbH, г. Васбек, Германия),
e-mail: ingo.decker-knuth@yandex.ru

Модернизация традиционной токарной обработки с применением современных технологий

На примере токарного станка Servoturn 410 компании KNUTH показаны возможности использования современных технологий для повышения эффективности токарных работ и сокращения затрат на производстве.

Ключевые слова: токарный станок, токарная обработка, оптимизация, ЧПУ, эффективность.

The opportunities of modern technologies application for improvement of lathe work effectiveness and cost saving at production are shown on the example of KNUTH company Servoturn 410 lathe.

Keywords: lathe, turning, optimization, CNC, effectiveness.

Даже в эпоху инструментальных станков с ЧПУ традиционные токарные работы остаются незаменимыми в промышленности, индивидуальном производстве и учебных мастерских.

Рассмотрим современные технологии, сочетание которых позволяет значительно повысить точность обработки и производительность традиционного токарного станка при одновременном уменьшении его изнашивания и снижении затрат на техническое обслуживание.

Так как данный анализ лучше проводить на конкретном примере, рассмотрим, какие высокие технологии применяются при работе токарного станка Servoturn 410 производства компании KNUTH Werkzeugmashinen GmbH (Германия), которая с 2000 г. работает на российском рынке, и поэтому многие крупные отечественные предприятия на практике знакомы с техникой KNUTH. Остановимся на технологических особенностях станка Servoturn 410, позволяющих повысить эффективность производства.

Функциональные особенности станка

При создании станка Servoturn 410 (рисунок) немецкая машиностроительная компания KNUTH поставила цель — разработать высокотехнологичный токарный станок для традиционных токарных работ, который был бы значительно дешевле токарных станков с ЧПУ начального уровня или циклическим управлением.

При проектировании и разработке станка Servoturn 410 решались две задачи: сохранить все возможности, которые использует опытный токарь

Токарный станок Servoturn 410 производства немецкой компании KNUTH Werkzeugmashinen GmbH

при выполнении традиционных токарных работ, и снять ограничения на функциональности, обусловленные конструкцией станка, повысив тем самым производительность. В результате был создан токарный станок с привычным управлением и включением некоторых элементов ЧПУ.

В станке Servoturn 410 три компонента традиционного токарного станка заменены компонентами, которые применяются в станках с ЧПУ, т. е. более высокого уровня.

1. Крестовый суппорт инструментальных салазок по двум осям оснащен прочными линейными подшипниками качения, которые представляют собой профильные направляющие и шариковые наконечники и рассчитаны на большие нагрузки. Это обеспечивает высокоточное перемещение токарного резца. Задняя бабка перемещается аналогично, и для ее позиционирования требуется лишь небольшое усилие.

2. Подача выполняется посредством шарикового ходового винта с приводом от серводвигателя. Механический привод заменен электронной системой, состоящей из датчика перемещений в шпиндельной бабке, который с высокой точностью определяет частоту вращения шпинделя, и высокоточного микроконтроллера, который определяет шаг подачи и передает данные на усилитель двигателя. Для ручного перемещения инструментальных салазок применяется электронный маховик с высокочувствительным управлением, поэтому не требуется больших усилий и обеспечивается высокая точность позиционирования.

3. Перемещение инструментальных салазок в поперечном направлении осуществляется также с помощью серводвигателя шарикового ходового винта вращением второго электронного маховика.

Применение комбинации линейных подшипников качения, приводов на основе шарикового циркуляционного ходового винта и серводвигателей позволило создать токарный станок, обеспечивающий качество обработки на уровне точности станков с ЧПУ. Станок Servoturn 410 отличается высокоточным позиционированием инструмента, минимальным остаточным люфтом, отсутствием эффекта прерывистого скольжения, а следовательно, равномерной подачей инструмента. Кроме того, на нем можно осуществлять высококачественную нарезку резьб. Servoturn 410 имеет бесступенчатую регулировку частоты вращения главного шпинделя до 3000 мин$^{-1}$ и режим постоянной скорости обтачивания при изменяющемся радиусе вращающейся детали, т. е. обеспечивается автоматическая настройка частоты вращения шпинделя, благодаря чему достигается высокое качество обработки поверхности при торцевой обточке.

При разработке станка Servoturn 410 компания KNUTH использовала опыт по созданию *литой станины из минерального сырья, наработанный* при производстве обрабатывающих центров с ЧПУ, что позволило впервые создать традиционный токарный станок с максимальным гашением вибраций. Это не только гарантирует высокое качество обработки поверхности, но и значительно уменьшает износ инструментов.

Новое в управлении токарного станка

Управление станком Servoturn 410 осуществляется так же, как и традиционными токарными станками:

позиционирование инструмента с помощью маховиков, включение подачи рычагами прямого и обратного хода, выбор определенных шага подачи и шага резьбы с помощью поворотного выключателя. Однако управлять станком Servoturn 410 легче, так как переключатели и рычаги используются только для электрического контакта. Электроника, используемая в новом станке, обеспечивает дополнительные возможности, которые соответствуют функциям ручного режима работы станков с ЧПУ;

концевые упоры устанавливаются с помощью электроники путем нажатия кнопки, что обеспечивает не только удобство в управлении, но и высокую точность, так как исключаются трудоемкая и ненадежная механическая установка концевых упоров и ограничение по точности механического сцепления при подаче;

дальние установочные перемещения инструментальных салазок по обеим осям легко выполняются с помощью джойстика;

можно непрерывно изменять подачу ручной коррекции, сохраняя при этом постоянную частоту вращения главного шпинделя (например для оптимизации вращения).

Отметим, что станки Servoturn отличаются оптимальным соотношением цена—качество и уже широко применяются не только в Германии, но и на мировом рынке.

Таким образом, использование современных технологий снижает затраты на техническое обслуживание и изнашивание оборудования и повышает эффективность производства.