ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

ЖУРНАЛ ВХОДИТ В ПЕРЕЧЕНЬ УТВЕРЖДЕННЫХ ВАК РФ ИЗДАНИЙ ДЛЯ ПУБЛИКАЦИЙ ТРУДОВ СОИСКАТЕЛЕЙ УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика (технические науки), 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела (технические науки), 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры (технические науки), 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин (технические науки), 05.02.04 — Трение и износ в машинах (технические науки), 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы (технические науки), 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки), 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии (технические науки), 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении (технические науки), 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) (технические науки), 05.02.18 — Теория механизмов и машин (технические науки), 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности (технические науки)

2019 Том 20 / 6 (227)

СОДЕРЖАНИЕ

Сборочное оборудование и его элементы

Розинов А.Я. Переносные средства сборки и их применение при выполнении монтажа металлических конструкций 243

Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Воркуев Д.С., Матросов А.Е., Миронова Е.А. Предельные режимы выполнения вспомогательных операций многошпиндельными завинчивающими устройствами 250

Технологическая оснастка для сборки

Жуков Д.В., Коновалов С.В., Афанасьев А.В. Особенности диагностики заводских дефектов труб, развивающихся при эксплуатации 258

Трение и смазка в машинах и механизмах

Губарев П.В., Тептиков Н.Р., Шапшал А.С., Морозкин И.С., Больших И.В. Методика проведения тяговых испытаний локомотивов 262

Ноженков М.В. Вихревые структуры роста кристаллов 266

В помощь конструктору, технологу

Самаркина Е.И., Самаркин А.И., Дмитриев С.И., Евгеньева Е.А. Электронная модель изделия как носитель конструкторско-технологической информации 284

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

E-mail: sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

ВЛАДИВОСТОК

Ю.Н. КУЛЬЧИН, акад. РАН
А.А. СУПОНЯ, к.т.н.

ВОЛГОГРАД

М.Г. КРИСТАЛЬ, д.т.н., проф.
В.И. ЛЫСАК, акад. РАН
В.М. ТРУХАНОВ, д.т.н., проф.

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОМСК

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

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

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

ГОМЕЛЬ

В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

КИЕВ

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

ДОНЕЦК

А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

Польша

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Сборка в машиностроении, приборостроении", 2019

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.01 — Theoretical mechanics, 01.02.04 — Mechanics of a deformable solid, 01.02.06 — Dynamics, durability of machines, devices and apparatus, 05.02.02 — Machine science of drive systems and machine parts, 05.02.04 — Friction and wear in machines, 05.02.05 — Robots, mechatronics and robotic systems, 05.02.07 — Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing, 05.02.10 — Welding, related processes and technologies, 05.02.11 — Control methods and diagnostics in mechanical engineering, 05.02.13 — Machines, units and processes (in particular industry), 05.02.18 — Theory of mechanisms and machines, 05.04.11 — Nuclear reactor construction of machine, units and technology of the nuclear industry materials

2019 Vol. 20 **6 (227)**

CONTENTS

Technological equipment for assembly

Rozinov A.Ya. Portable assembly tools and their application during installation metal construction 243

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Vorkuev D.S., Matrosov A.E., Mironova E.A. Limit modes of auxiliary operations multi-spindle screwing devices 250

Production tools and machinery for assembly

Zhukov D.V., Konovalov S.V., Afanasiev A.V. Features of diagnostics of factory defects of pipes developing under conditions of operation 258

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Gubarev P.V., Teptikov N.R., Shapshal A.S., Morozkin I.S., Bolshikh I.V. The technique of carrying out of traction tests of locomotives 262

Nozhenkov M.V. Vortex growth of crystal structures 266

Industrial and design engineer's aid

Samarkina E.I., Samarkin A.I., Dmitriev S.I., Evgenyeva E.A. Electronic model of the product as a carrier of design and technological information 284

Journal is distributed on subscription, whith can be issues in any post office (index on the catalogue of the "Pressa Rossii" — **84967**) or directly in editorial of the journal.
Ph.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96
E-mail: sborka@mashin.ru, http://www. mashin.ru
The reference to the Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making Journal during reprint of the materials is mandatory.
Advertisers are responsible for the content of their advertisements.

Chair of Editorial Advisory Board — Member of Russian Academy of Science
V.I. KOLESNIKOV

Editors

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

Regional editors

VLADIVOSTOK
Yu.N.KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON
A.A. RYZHKIN

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

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland
P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

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

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

© "Innovative Mashinostroenie" Publishers, "Assembling in Mechanical Engineering and Instrument-Making", 2019

УДК 331.101.6

А.Я. Розинов, *д-р техн. наук*
Тел. 8(812) 532-7742

Переносные средства сборки и их применение при выполнении монтажа металлических конструкций

Представлены результаты исследований возможности создания сборочными устройствами с винтовыми, пневмогидравлическими и пневмомеханическими нажимными элементами сил, требуемых для сборки соединений листов и балок металлоконструкций. Рассмотрены особенности конструктивного устройства средств сборки и технические характеристики конкретных устройств. Дан расчет необходимого количества средств сборки для комплексного оснащения ими рабочих мест сборщиков, выполняющих монтаж металлоконструкций в цеховых условиях и на открытых строительных площадках. Приведены конструктивно-технологические решения инструментально-транспортных контейнеров, предназначенных для хранения и транспортировки необходимого количества средств сборки к местам их использования в цехе или открытой строительной площадке.

The results of studies of the assembly of sheet and metal structure joints assemblies, as well as the possibilities of their creation by assembling devices with screw, pneumatic-hydraulic and pneumomechanical pressure elements are presented. The features of the constructive device means of assembly and the technical characteristics of specific representatives of these devices are considered. The calculation of the number of various assembly tools required for complex equipping of assemblers' workplaces with them, assembling metal structures in workshop conditions and at open construction sites is given. Constructive-technological solutions of instrumental and transport containers for storing and transporting the required number of assembly tools to the places of their use in the workshop or an open construction site are proposed.

Ключевые слова: лист, балка, силы сборки, сборочные клинья, нажимные винты, гидравлический домкрат, гидравлический талреп, ручной привод, пневмогидравлический привод, стяжки-распорки, пневмомеханический привод, ударно-вращательный преобразователь, гайковерт, комплексное оснащение, трудоемкость, коэффициент использования, коэффициент сменности, коэффициент потерь рабочего времени, инструментально-транспортный контейнер.

Keywords: sheet, beam, assembly force, wedge assembly, thrust screw, hydrostatic trigger, cord strainer, hand drive, pneumohydraulic drive, tie-struts, pneumomechanical drive, rotary impact converter, screwdriver, complex equipment, laboriousness, operating ratio, annual fund of working time, shift factor, loss factor, tool-transport container.

Исследования сил, необходимых для сборки соединений металлических конструкций, позволили установить, что их величина изменяется в зависимости от толщины соединяемых листов и требуемого момента инерции (рис. 1).

При сборке металлических конструкций силы, обеспечивающие соединение листов и балок подкрепляющего их набора, традиционно создают с помощью переносных средств сборки, оборудованных нажимными элементами, обеспечивающими преобразование ручного физического труда в требуемую сборочную силу. Для сборки соединений листов толщиной до 10 мм и балок с моментом инерции поперечного сечения до 10 см^4 используют средства сборки с винтовым нажимным элементом; листов толщиной 10...20 мм и балок с моментом инерции поперечного сечения от 10 до 1000 см^4 — средства сборки с ручным гидравлическим насосом. Сборку соединений листовых конструкций, толщина которых превышает 20 мм, и соединений балок этих конструкций с моментом инерции поперечного

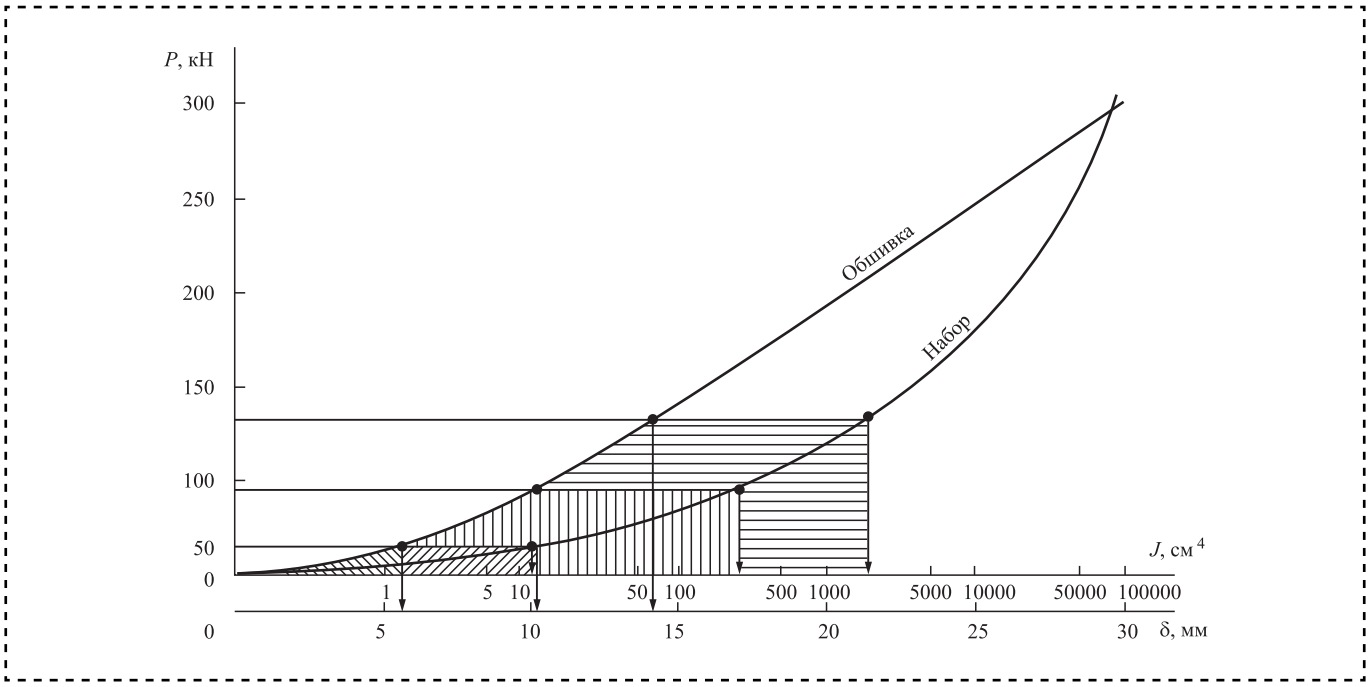


Рис. 1. График изменения сил сборки в зависимости от толщины соединяемых металлических листов и моментов инерции соединяемых балок профильного набора

сечения, превышающим 1000 см^4, осуществляют средствами, оборудованными пневмогидравлическим или пневмомеханическим силовым приводом.

В табл. 1 приведены характеристики типовых средств сборки соединений металлических конструкций, обеспечивающих создание сборочных сил путем забивания кувалдой сборочных клиньев или завинчиваемых вручную нажимных винтов.

Таблица 1

Типовые средства сборочных сил забиванием клиньев и завинчиванием вручную нажимных винтов

Устройство	Сила Н, max	Типоразмеры (длина×высота), мм	Масса, кг
Клин сборочный	75 000	150×28 250×35	1,75 5,2
Устройство типа "рыбий хвост"	10 000	275×210 500×275 600×300 700×360	5,5 11,7 15,9 16,4
Приварная скоба с нажимным винтом	30 000	124×86 185×130 230×170 320×230 410×305 530×380	0,6 0,56 2,94 6,47 13,8 24,7
Скоба с двумя нажимными винтами для правки	60 000	275×210 500×275 600×300 700×360	23,1 24,6 26,7 27,4

Недостаток подобных средств сборки — низкая производительность выполняемых работ из-за существенных затрат тяжелого физического труда.

Для снижения объема тяжелого физического труда применяют средства сборки, основанные на использовании гидравлических домкратов с ручным приводом: прижимы для сборки соединений обшивки, включающие опорную скобу, зацепляемую за временно приваренный рым, а также ввинченный в опорную скобу гидравлический силовой элемент с ручным приводом домкрата. Для выполнения монтажных работ, связанных с установкой металлических конструкций в требуемое для сборки положение, разработаны гидравлические домкраты и гидравлические талрепы с ручным приводом (рис. 2).

В табл. 2 представлены технические характеристики различных средств сборки соединений металлоконструкций, силовой привод которых приводится в действие встроенным гидравлическим домкратом с ручным приводом.

Практика применения подтвердила эффективность использования этих средств для

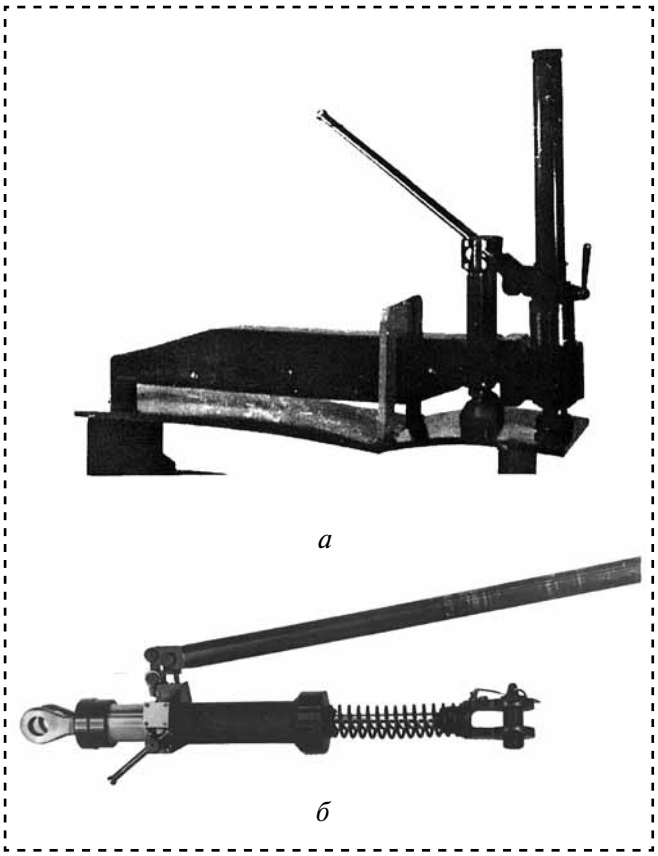


Рис. 2. Приспособление с винтовым и гидравлическим прижимами для сборки соединений листов (*а*) и гидравлический талреп (*б*)

сборки соединений листов средней толщины и балок набора средних размеров. Однако их использование для соединения толстолистовой обшивки и подкрепляющего ее набора (балок таврового сечения, характеризующихся значительной жесткостью) оказывается недостаточно эффективным, так как напрямую зависит от профессиональных возможностей человека, его физического развития, природной выносливости и т.п. Поэтому для выполнения сборки толстолистовых металлических конструкций разработан комплекс средств механизации пневмогидравлического и пневмомеханического действия. Комплекс средств механизации пневмогидравлического действия включает средства сборки типа домкратов и стяжек-распорок (рис. 3).

Отличительная конструктивно-технологическая особенность стяжек-распорок и домкратов пневмогидравлического действия — наличие в них поршневого пневматического двигателя, обеспечивающего создание необходимого давления в гидравлическом насосе встроенного гидравлического домкрата. Это позволяет выполнять сборку соединений листов обшивки и балок без каких-либо затрат ручного труда, производительность которого полностью определяется механизированным приводом средств сборки (табл. 3).

В зарубежном судостроении и смежных отраслях промышленности широко применяют стяжки-домкраты, у которых изменение направления силового действия осуществляли, например, применением двух гидравлических цилиндров, либо гидравлического цилиндра двойного действия. Оснащение двумя гидравлическими цилиндрами или цилиндром двойного действия существенно усложняет конструкцию сборочного устройства, а также увеличивает его габаритные размеры и массу. Поэтому в стяжке-распорке пневмогидравлического действия применено иное решение,

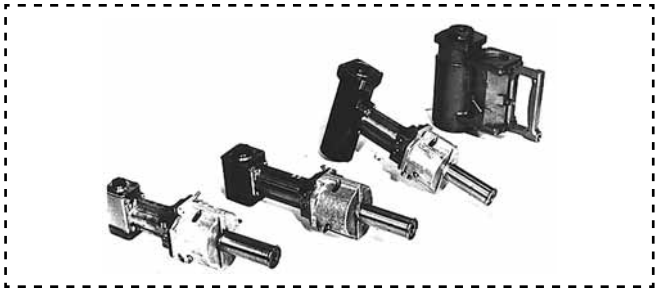


Рис. 3. Комплекс средств сборки пневмогидравлического действия, включающий домкраты и стяжку-распорку

Таблица 2

Средства сборки со встроенным гидравлическим домкратом, имеющим ручной привод

Характеристики	Прижимы		Домкраты		Талрепы				
Сила, Н	50 000	100 000	250 000	500 000	50 000	100 000	150 000	200 000	250 000
Наибольший ход штока гидравлического плунжера, мм	30	35	70	75	60	100	90	100	100
Масса с учетом залитого масла, кг	3,5	5,0	15,8	22,0	5,0	9,8	14,5	16,4	16,0
Габаритные размеры (длина×ширина), мм	450×140	470×140	200×150	215×175	390×110	540×100	560×150	580×95	615×210

Таблица 3

Средства механизации пневмогидравлического действия

Характеристики	Домкраты				Стяжки-распорки	
	ДПГ-10	ДПГ-20	ДПГ-21	ДПГ-50	Тип I	Тип II
Сила, Н	100 000	200 000	200 000	500 000	150 000	250 000
Ход штока гидравлического плунжера, мм, max	60	100	100	100	85	100
Масса с учетом залитого масла, кг	7,5	14	16	24	15	18
Габаритные размеры (длина×ширина), мм	430×135×64	450×200×90	450×205×114	560×205×132	250×240×100	300×240×110

обеспечивающее изменение направления сборочной силы: пневмогидравлическая стяжка-распорка имеет нажимной плунжер гидравлического домкрата с центральным сквозным отверстием для прохода тяги-реверсора. С использованием указанной тяги и без нее пневмогидравлическая стяжка-распорка может быть использована как талреп (с установленной тягой) либо как домкрат (без применения тяги-реверсора).

Практика выполнения сборки соединений металлических конструкций свидетельствует о том, что применяемые средства (домкраты и т.п.) зачастую используют в качестве соединительного звена, удалить которое до конца процесса сборки не представляется возможным. Это увеличивает непроизводительный простой и существенно снижает эффективность применения используемых средств сборки. Указанный недостаток удается устранить при помощи домкратов пневмогидравлического действия.

Эксплуатационная стоимость средств механизации сборки (гидравлических и пневмогидравлических домкратов) значительно выше, чем стоимость винтовых или клиновых сборочных устройств. С учетом этого разработан комплекс винтовых и механических приспособлений, предназначенных для совместного использования с пневмогидравлическими домкратами.

В процессе сборки указанные приспособления используют в качестве соединительного звена, передающего сборочные силы, создаваемые пневмогидравлическими домкратами. Для этого каждое из приспособлений имеет конструктивное окно, в которое установлен силовой узел пневмогидравлических домкратов, изготовленный в виде молотка (см. рис. 3). Такая форма корпуса пневмогидравлических домкратов позволяет использовать их в качестве универсальных силовых приводов, которые могут быть вставлены в различные сборочные приспособления для стягивания соединяемых металлических конструкций, сведения концов стыкуемых балок набора и т.п. на период сборки и удалены из них без удаления применяемых приспособлений, сохраняемых в качестве соединительного звена на весь период сборки.

Указанная технология сборки позволяет существенно сократить непроизводительные простои дорогостоящих средств механизации и осуществить процесс сборки с применением простейших сборочных устройств при исключении затрат тяжелого ручного труда.

Наряду со средствами выполнения сборки, имеющими пневмогидравлический привод разработаны и используются домкраты и гайковерты с пневмомеханическим приводом (рис. 4). Основой этих средств механизации является ударно-вращательный преобразователь. Небольшие габаритные размеры и масса позволяют средствам с пневмомеханическим приводом работать в стесненных условиях и в различном пространственном положении. Простота конструкции, надежность и безопас-

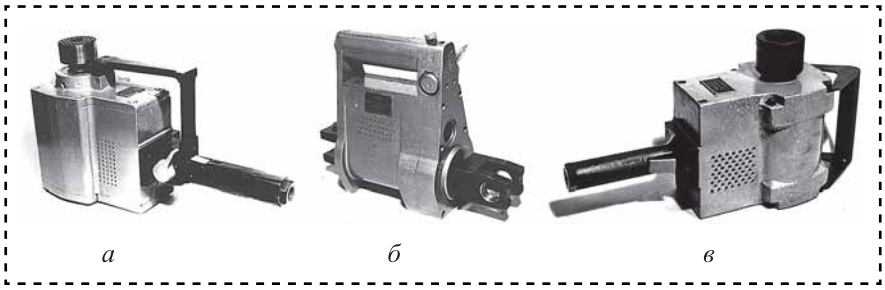


Рис. 4. Домкрат (*а*); стяжка-распорка (*б*); гайковерт (*в*)

Таблица 4

Средства механизации с пневмомеханическим приводом

Характеристики	Домкраты			Стяжка-распорка	Гайковерты		
	ДПУ-10	ДПУ-20	ДПУ-40	СПУ-20	ГПУ-80	ГПУ-150	ГПУ-400
Сила, Н	100 000	200 000	400 000	200 000	200 000	300 000	500 000
Масса, кг	6	12	27	14	4,5	9,6	18,7
Габаритные размеры (длина×высота×ширина), мм	355×100×155	390×125×200	490×160×270	125×270×350	100×180×300	135×210×435	165×190×570

ность в эксплуатации, отсутствие реактивного момента, обеспечивают их эффективное применение (табл. 4).

Необходимое число средств сборки для комплексного оснащения рабочих мест может быть рассчитано на основе выражения:

$$N = \frac{QK_{\text{п}}}{\Phi K_{\text{н}} K_{\text{с}} K_{\text{р}}},$$

где Q — трудоемкость сборочных работ, выполняемых при монтаже металлических конструкций в цехе или на открытых площадках в течение года, чел. ч;

$K_{\text{н}}$ — коэффициент использования (по продолжительности) рассматриваемого вида средства сборки соединений листов или балок набора металлических конструкций (с учетом сменности работы цеха или открытой строительной площадки);

Φ — годовой фонд рабочего времени, чел. ч;

$K_{\text{п}}$ — коэффициент выработки норм в цехе или на строительной площадке;

$K_{\text{с}}$ — коэффициент сменности работы цеха или строительной площадки;

$K_{\text{р}}$ — коэффициент потерь рабочего времени на ремонт или замену средств сборки.

С учетом необходимости обеспечения заданного годового выпуска металлоконструкций, изготавливаемых в цехе или на строительной площадке, бригады сборщиков должны быть оснащены средствами сборки, состав и число которых указаны в табл. 5.

Таблица 5

Состав и число средств стапельной сборки, необходимых для оснащения бригады судовых сборщиков

Средства сборки	Тип или марка средства	Число средств стапельной сборки судов	
		малого водоизмещения (до 3000 т)	среднего и крупного водоизмещения
Механические	Клин сборочный	18	30
	Устройство типа «рыбий хвост»	8	12
	Приварная скоба с нажимным винтом	5	7
	Скобы с двумя нажимными винтами для правки	3	5
Гидравлические	Прижимы силой, кН:		
	50	2	—
	100	—	2
	Домкраты силой, кН:		
	250	—	2
	500	—	2
	Талрепы силой, кН:		
	50	2	—
	100	1	—
	150	—	2
	200	—	2
	250	—	2

Окончание табл. 5

Средства сборки	Тип или марка средства	Число средств стапельной сборки судов	
		малого водоизмещения (до 3000 т)	среднего и крупного водоизмещения
Пневмо-гидравлические	Домкраты:		
	ДПГ-10	2	1
	ДПГ-20	1	2
	ДПГ-21	1	2
	ДПГ-50	—	2
	Стяжки-распорки силой, кН:		
	150	1	—
	250	—	1
Пневмо-механические	Домкраты:		
	ДПУ-10	2	1
	ДПУ-20	1	2
	ДПУ-40	—	1
	Стяжка-распорка:		
	СПУ-20	1	2
	Гайковерты:		
	ГПУ-80	2	1
	ГПУ-150	1	2
	ГПУ-400	—	1

Конструктивно-технологические особенности металлических конструкций, монтируемых в цехе или на строительных площадках, свидетельствуют о том, что выполняемые на этих конструкциях соединения их листовых частей и балок набора, подкрепляющего эти листы, должны выполняться на различной высоте и в условиях различной степени доступности, что в существенной мере затрудняет доставку средств сборки.

Оснащение рабочих мест, расположенных на различной высоте монтируемых металлических конструкций, внутри этих конструкций или снаружи, в том числе на площадках лесов, необходимыми и в требуемом количестве средствами сборки может быть обеспечено объединением представленных в табл. 5 средств сборки на базе инструментально-транспортных контейнеров, доставляемых к месту выполнения сборочных работ мостовыми кранами цехов или портальными кранами открытых строительных площадок.

Инструментально-транспортные контейнеры бывают двух типов, соответствующих условиям выполнения сборки в цехах и на открытых строительных площадках, где следует учитывать необходимость защиты от климатического воздействия — низких температур, осадков и т.п.

Климатически защищенный инструментально-транспортный контейнер представляет собой замкнутую металлоконструкцию для хранения средств сборки и их подачи к местам выполнения сборочных работ. Наряду с необходимыми средствами сборки в контейнерах должно быть газорезательное и газосварочное оборудование: сварочные щитки, сварочные кабели, а также воздушные и газоподводящие шланги, электродержатели, газовые резаки и простейший проверочный инструмент (рис. 5).

Количественный состав оборудования, находящегося в инструментально-транспортном контейнере, определяется характером выполняемых сборочных работ и численным составом бригады рабочих сборщиков. Подобный инструментально-транспортный контейнер является не только средством транспортирования, но также может служить средством улучшения организации условий труда бригады рабочих сборщиков, состоящей из 6—10 человек. Внутреннее помещение инструментально-транспортного контейнера утеплено и может быть использовано для кратковременного отдыха и обогрева при низкой температуре окружающего воздуха. В случае необходимости (укрытия от непогоды или отдыха) в помеще-

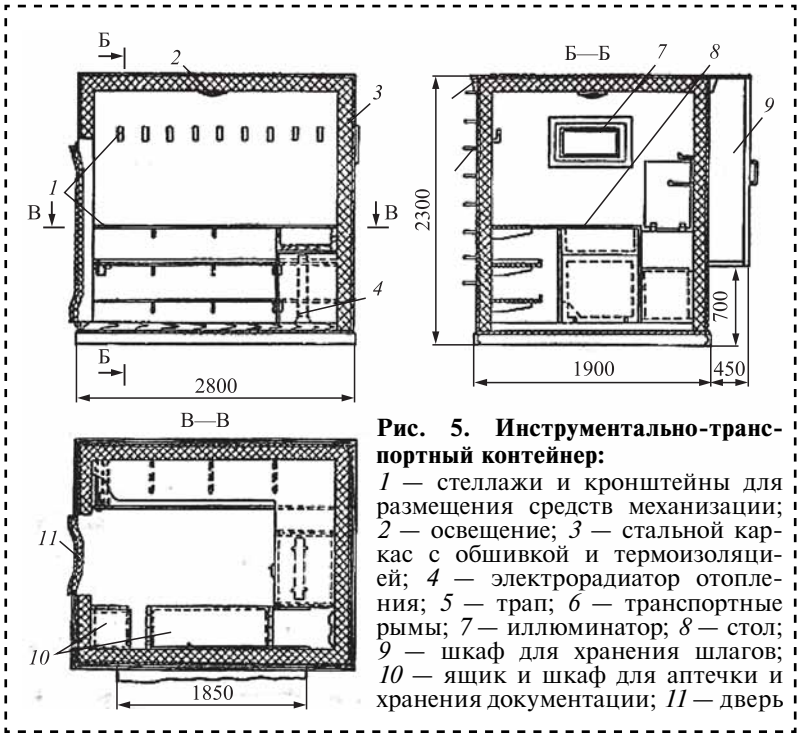


Рис. 5. Инструментально-транспортный контейнер:
1 — стеллажи и кронштейны для размещения средств механизации; *2* — освещение; *3* — стальной каркас с обшивкой и термоизоляцией; *4* — электрорадиатор отопления; *5* — трап; *6* — транспортные рымы; *7* — иллюминатор; *8* — стол; *9* — шкаф для хранения шлагов; *10* — ящик и шкаф для аптечки и хранения документации; *11* — дверь

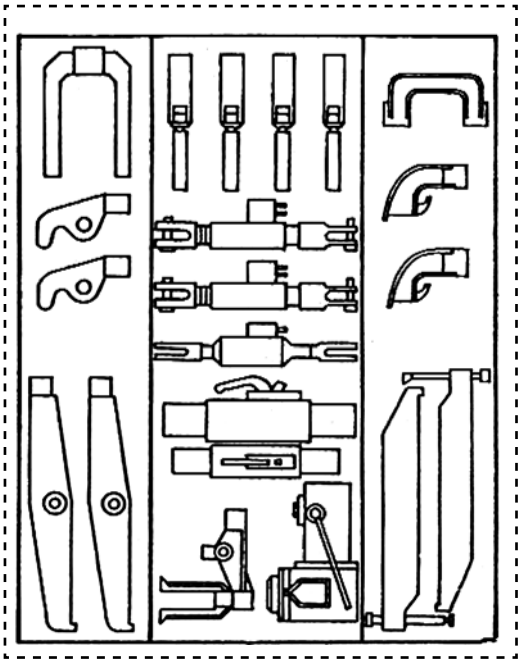


Рис. 6. Инструментально-транспортный контейнер упрощенной конструкции

нии инструментально-транспортного контейнера могут одновременно находиться 3—4 человека.

Инструментально-транспортный контейнер с находящимися в нем средствами выполнения сборочных работ, портальным краном устанавливают в максимальной близости к месту выполнения сборочных работ, что позволяет достигнуть существенной экономии непроизводительных трудозатрат по обеспечению рабочих мест необходимым оборудованием и создать тем самым благоприятные условия для роста производительности труда рабочих сборщиков.

В случае осуществления монтажа металлических конструкций в условиях цеха, защищенного от климатического влияния и оборудованного различными системами энергоснабжения, применяют инструментально-транспортные контейнеры упрощенной конструкции, предназначенные только для комплектации и транспортирования необходимых средств сборки к рабочим местам бригады рабочих сборщиков (рис. 6).

УДК 621.757

Ю.З. Житников, *д-р техн. наук*
(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева),
Б.Ю. Житников, *д-р техн. наук (ВЮИ, г. Владимир),*
Д.С. Воркуев, *д-р техн. наук (ОАО "Завод им. Дегтярева", г. Ковров),*
А.Е. Матросов, *канд. техн. наук,* **Е.А. Миронова**
(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева)
E-mail: kgta_tms@mail.ru

Предельные режимы выполнения вспомогательных операций многошпиндельными завинчивающими устройствами

Приведены теоретические обоснования и проверенные в производстве предельные режимы надежного выполнения вспомогательных операций многошпиндельными завинчивающими устройствами, созданными на основе универсальной кинематической схемы, при подаче узла на позицию сборки и подводе устройства к собираемому узлу.

Provides the theoretical background and tested in the production of limit regimes robust support multi-spindle screwed, created on the basis of a universal kinematic scheme, when submitting a node in the assembly position of the cart and device to collect node.

Ключевые слова: автоматизированная сборка, многошпиндельный шпильковерт, вспомогательные операции, шаговый конвейер, предельные режимы работы, упругий удар, динамика движения.

Keywords: automated assembly, multi-spindle screwing, auxiliary operations, step conveyor, limit modes of operation, elastic shock, dynamics of movement.

При автоматизированной сборке изделий время выполнения вспомогательных операций (подача узла на позицию сборки, подвод и отвод исполнительного органа сборочного оборудования и др.) может значительно превосходить время осуществления самой операции сборки, что значительно снижает производительность технологического процесса. Поэтому снижение времени автоматизированного выполнения вспомогательных операций — актуальная задача сборочного производства.

Обоснование предельных режимов выполнения вспомогательных операций может значительно повлиять на производительность сборки изделий.

Разработана и внедрена в сборочное производство конструкция многошпиндельного завинчивающего устройства шпилек, созданная на основе универсальной кинематической схемы (рис. 1).

Устройство состоит из станины *10*, питателя шпилек (условно не показан), который расположен над верхней плитой *9*, направляющих штанг *11* с пружинами *22*, рабочего *12* и удерживающего *14* пневмоцилиндров, держателя *17*, на котором закреплены шпильковерты *13* с патронами *19* для удержания шпилек при завинчивании и затяжке, кондукторной плиты *23*, снабженной коническими штифтами *2*, предназначенными для доориентации собираемого узла *1*, расположенного на шаговом конвейере (условно не показан).

Шток *16* соединен с кондукторной плитой *23*, на которой с возможностью поворота расположена втулка *24* со стержнями *6,* жестко связанными с втулками *5* наконечников *4* витых цилиндрических пружин *8*, которые выполняют функции лотков для подачи шпилек в отверстия кондукторной плиты.

Устройство работает следующим образом. В исходном положении держатель *17* шпильковертов *13* находятся в верхнем положении, а поршень удерживающего пневмоцилиндра *14* поднят. При этом выходные отверстия

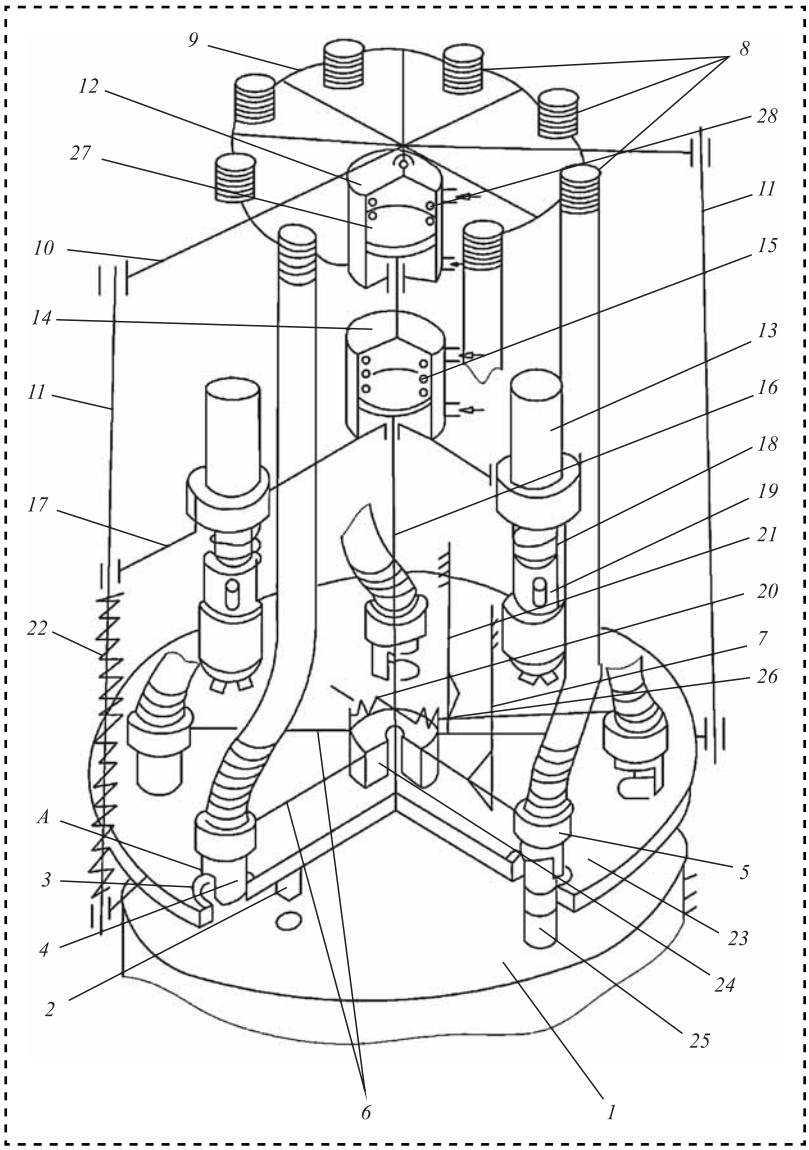


Рис. 1. Кинематическая схема устройства

наконечника *4* перекрыты кондуктором *23*, так как наконечники *4* смещены относительно направляющих втулок *3* на некоторый угол. Сжатый воздух из нижней полости удерживающего пневмоцилиндра *14* выпускается, кондукторная плита под действием собственного веса, веса держателя *17* со шпильковертами *13* и пружины *18* опускается вниз и штифтами *2* доориентирует собираемый узел *1*.

Срабатывает питатель и шпильки по трубкам *8* движутся вниз и упираются в фаски резьбовых отверстий узла.

Выпускается сжатый воздух из нижней полости удерживающего пневмоцилиндра *14*. Начинает опускаться держатель *17* и стержни *21*, на которых расположены кулачки *7*, воздействуют на стержни *6*, поворачивая втулку *24*, отводя наконечники *4* вместе с витыми цилиндрическими пружинами из зоны расположения шпилек в отверстиях кондукторной плиты. Одновременно включается вращение шпильковертов *13*, и патроны *19* разрезными резьбовыми кулачками захватывают шпильки за верхнюю резьбовую часть.

Происходит автоматизированная доориентация шпилек с резьбовыми отверстиями на узле, завинчивание и затяжка. Отключаются шпильковерты *13*. Процесс сборки завершен.

Для съема с завинченных шпилек патронов с разрезными резьбовыми кулачками в нижнюю полость удерживающего пневмоцилиндра *14* импульсно подается давление и за счет сил инерции патроны "сдергивают" кулачки и отводят кондукторную плиту *23* от собранного узла на некоторое расстояния. Под действием пружин *22* устройство возвращается в исходное положение. Одновременно кулачки *7* сходят со стержней *6* и втулка *24* под действием пружин *20*, *26* возвращается в исходное положение, устанавливая наконечник *4* над отверстиями кондукторной плиты *23*.

Завинчивающее устройство приведено в исходное положение.

Для описания динамики движения системы предварительно определим последовательность выполнения операций подачи сборочного узла на сборочную позицию и подвода к нему сборочного устройства:

— подача шаговым конвейером собираемого узла на позицию сборки;

— подвод кондукторной плиты *23* завинчивающего устройства к собираемому узлу;

— выпадение из питателя комплекта шпилек и их движение по пружинным трубкам *8* (лоткам) до упора в поверхность узла;

— опускание плиты держателя *17* с расположенными на них шпильковертами *13* для захвата шпилек *25* вращающимися патронами *19* с разрезными резьбовыми кулачками с одновременным отводом наконечников *4* подающих трубок, от направляющих втулок *3* кондукторной плиты *23*.

Опишем динамику движения элементов завинчивающего устройства дифференциальными уравнениями и получим математические зависимости предельных режимов выполнения этих операций от параметров элементов устройства, шпилек и физико-механических свойств их материалов.

Подача шаговым конвейером собираемого узла на позицию сборки

Предельная скорость подачи собираемого узла на позицию сборки определяется предельной скоростью ударного взаимодействия сферических упоров плиты шагового конвейера о неподвижную плоскость, при которой на взаимодействующих поверхностях возникали бы только упругие деформации, исключающие смещение собираемого узла относительно положения исполнительного органа сборочного оборудования (рис. 2). Дифференциальное уравнение ударного взаимодействия поверхности плиты и сфер в проекции на ось, направленную по движению конвейера [3, 5]:

$$m\mathrm{v}_0 = F_{\text{уд}}\Delta t, \qquad (1)$$

где m — суммарная масса плиты шагового конвейера и собираемого узла;

v_0 — скорость плиты конвейера в момент удара;

$F_{\text{уд}}$ — сила удара;

Δt — время удара.

В уравнении (1) три неизвестных v_0, $F_{\text{уд}}$, Δt.

Для решения уравнения (1) воспользуемся выражением равенства работ при ударе $A_{\text{уд}}$ и медленного сжатия $A_{\text{сж}}$ при одинаковой деформации взаимодействующих поверхностей тел [3, 4]:

$$A_{\text{уд}} = A_{\text{сж}};$$
$$A_{\text{уд}} = F_{\text{уд}}h_{\text{уд}}; \qquad (2)$$
$$A_{\text{сж}} = A_{\text{см}} = F_{\text{см}}h_{\text{см}},$$

где $h_{\text{уд}}$ — упругая деформация взаимодействующих поверхностей при ударе;

$F_{\text{см}}$ — предельная сила смятия при упругой деформации взаимодействующих поверхностей;

$h_{\text{см}}$ — упругая деформация при смятии.

Считаем, что при ударе упругая деформация происходит равнозамедленно, тогда

$$A_{\text{уд}} = F_{\text{уд}}\mathrm{v}_{\text{ср}}\Delta t = F_{\text{уд}}\frac{\mathrm{v}_1 + \mathrm{v}_2}{2}\Delta t = F_{\text{уд}}\frac{\mathrm{v}_0}{2}\Delta t,$$

где $\mathrm{v}_{\text{ср}}$ — средняя скорость упругого деформирования поверхностей;

v_1 — скорость движения плиты конвейера после удара, $\mathrm{v}_1 = 0$.

Работа, совершаемая при медленном деформировании взаимодействующих поверхностей:

$$A_{\text{см}} = F_{\text{ин}}h_{\text{см}} = [\sigma_{\text{см}}]S_{\text{см}}h_{\text{см}} = [\sigma_{\text{см}}]\pi a^2 h_{\text{см}},$$

где $[\sigma_{\text{см}}]$ — предельное напряжение при упругом смятии;

$S_{\text{см}}$ — площадь смятия, $S_{\text{см}} = \pi a^2$;

$F_{\text{ин}}$ — сила инерции.

Площадь пятна контакта поверхностей, учитывая, что $P = F_{\text{см}}$, запишем [1, 2]:

$$a = 1{,}109\sqrt[3]{\frac{PR}{E}} = 1{,}109\sqrt[3]{\frac{[\sigma_{\text{см}}]\pi a^2\left(E_1 + E_2\right)R}{2E_1E_2}}, \qquad (3)$$

где R — радиус сферы упора;

E — приведенный модуль упругости взаимодействующих материалов;

E_1, E_2 — модуль упругости материала неподвижной плиты и сферического упора.

Найдем полуось пятна контакта: возведем выражение (3) в третью степень, а полученное значение разделим на a^2:

$$a = \frac{1{,}109^3\left[\sigma_{\text{см}}\right]\pi\left(E_1 + E_2\right)R}{2E_1E_2}.$$

Запишем выражение упругой деформации взаимодействующих поверхностей [1, 2]:

$$h_{\text{см}} = \alpha_y = 1{,}231\sqrt[3]{\frac{P^2}{E^2R}} =$$
$$= \frac{0{,}465\left[\sigma_{\text{см}}\right]^2\pi^2\left(E_1 + E_2\right)^2}{E_1^2E_2^2}.$$

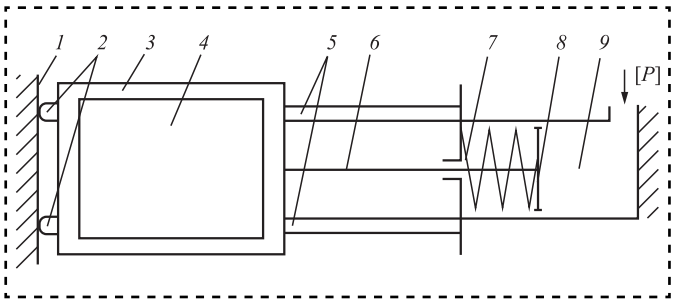


Рис. 2. Схема движения шагового конвейера:
1 — неподвижная плита; *2* — сферические упоры; *3* — плита шагового конвейера; *4* — собираемый узел; *5* — направляющие штанги конвейера; *6* — шток пневмоцилиндра; *7* — пружина; *8* — поршень; *9* — пневмоцилиндр

После подстановок окончательно получим предельную скорость ударного взаимодействия поверхностей неподвижной плиты и сферического упора, при которой на взаимодействующих поверхностях будут возникать только упругие деформации, т.е. предельную скорость движения шагового конвейера:

$$\mathrm{v}_0 = \frac{[\sigma_{\text{см}}]^2 \pi^2 (E_1 + E_2)^2}{E_1^2 E_2^2 m} \sqrt{0,432[\sigma_{\text{см}}]\pi}. \quad (4)$$

Для обеспечения такой скорости удара найдем жесткость пружины на основе принципа Доламбера [5] (рис. 3).

Для плоской системы сил имеем:

$$\sum \bar{F}_j^{\text{в}} + \sum \bar{R}_j + \sum \bar{F}_j^{\text{ин}} = 0,$$

где $\sum \bar{F}_j^{\text{в}}$ — векторная сумма действующих сил;

$\sum \bar{R}_j$ — векторная сумма реакций связей;

$\sum \bar{F}_j^{\text{ин}}$ — векторная сумма сил реакций.

Силу пневмоцилиндра конвейера запишем:

$$F_{\text{пц}_2} = [P]\frac{\pi D_{\text{п}_2}^2}{4}, \quad (5)$$

где $[P]$ — давление сжатого воздуха в пневмоцилиндре;

$D_{\text{п}_2}$ — диаметр поршня.

Сила вязкого трения с учетом выражения (4):

$$R_{\text{тр}} = b\mathrm{v}_{\text{ср}} = b\frac{\mathrm{v}_0}{2} = \frac{b[\sigma_{\text{см}}]^2 \pi^2 (E_1 + E_2)^2}{2mE_1^2 E_2^2}\sqrt{0,432[\sigma_{\text{см}}]\pi}, \quad (6)$$

где b — коэффициент вязкого трения.

Сила инерции, возникающая при торможении в момент удара [5]:

$$F^{\text{ин}} = mW_0 = \frac{G}{g}W_\tau,$$

где W_τ — касательное или тангенциальное ускорение.

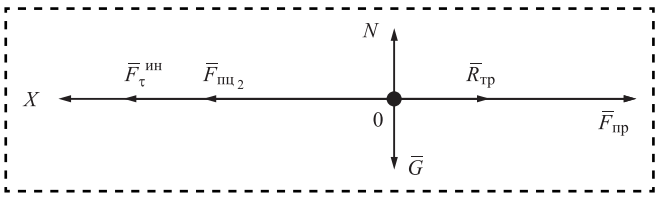


Рис. 3. Расчетная схема

При равнозамедленном торможении шагового конвейера [5]:

$$S_2 = \frac{W_\tau t^2}{2}; \quad (7)$$

$$\mathrm{v}_1 = \mathrm{v}_0 - W_\tau t, \quad (8)$$

где S_2 — путь торможения, который равен величине упругой деформации взаимодействующих поверхностей плиты и сферического упора.

Из выражений (7) и (8) находим ускорение:

$$W_\tau = \frac{\mathrm{v}_0^2}{2S_2}.$$

Сила пружины пневмоцилиндра конвейера в момент удара находится из выражения:

$$F_{\text{пр}_2} = C_2(S_2 + \Delta\lambda_2), \quad (9)$$

где C_2 — жесткость пружины пневмоцилиндра;

$\Delta\lambda_2$ — предварительная деформация пружины.

В проекции на ось x выражение (4) с учетом действующих сил запишем:

$$F_\tau^{\text{ин}} + F_{\text{пц}_2} - R_{\text{тр}} - F_{\text{пр}_2} = 0. \quad (10)$$

Подставим в выражение (10) действующие силы и после преобразования найдем жесткость пружины пневмоцилиндра шагового конвейера:

$$C_2 > \left([P]\frac{\pi D_{\text{п}}^2}{4} + \frac{0,216[\sigma_{\text{см}}]^5 \pi^5 (E_1 + E_2)^4}{mS_2 E_1^2 E_2^2} - \frac{b[\sigma_{\text{см}}]^2 \pi^2 (E_1 + E_2)^2}{2mE_1^2 E_2^2}\sqrt{0,432[\sigma_{\text{см}}]\pi}\right) \Big/ (S_2 + \Delta\lambda_2). \quad (11)$$

Подвод кондукторной плиты завинчивающего устройства к собираемому узлу

При выпускании сжатого воздуха из нижней полости пневмоцилиндра *12* кондукторная плита *23* под действием собственного веса, веса пневмоцилиндра *14*, держателя *17* и расположенных на нем шпильковертов *13*, пружины *28* перемещается вниз.

Пружины *22* — $F_{\text{пр}_3}$, а также сила вязкого трения R в направляющих *11* препятствуют перемещению. Кондукторная плита своими коническими штифтами *2* доориентирует незакрепленный собираемый узел на шаговом конвейере.

При ударном взаимодействии штифтов *2* с фаской отверстия узла может произойти ее пластическая деформация, что повлияет на качество сборки узла с сопрягаемой с ним деталью.

Следовательно, предельная скорость движения кондукторной плиты определяется предельной скоростью ударного взаимодействия штифтов с фасками отверстия на узле.

Воспользуемся дифференциальным уравнением для случая удара:

$$m\mathrm{v}_0 = F_{\text{уд}}\Delta t.$$

Для решения уравнения воспользуемся выражением равенства работ при одинаковой деформации при ударе и медленном сжатии взаимодействующих деталей.

Взаимодействие конических поверхностей штифта и фаски отверстия узла в месте удара можно представить как взаимодействие цилиндрических поверхностей на малой длине взаимодействия. Полуось пятна контакта a находим из выражения [1, 2]:

$$a = 1,522\sqrt[3]{\frac{qR_1 + R_2}{E\left(R_1 + R_2\right)}},$$

где q — удельная нагрузка на единицу длины l;

R_1, R_2 — средние значения радиусов конуса штифта и фаски отверстия в месте контакта соответственно.

Удельная нагрузка [1, 2]:

$$P = \frac{4}{3}aq.$$

Площадь взаимодействия поверхностей фаски отверстия и конуса штифта равна:

$$S_{\text{см}} = 2al/\cos\alpha.$$

Нормальную составляющую силы взаимодействия P находим из выражения:

$$P\sin\alpha = F_{\text{см}}\sin\alpha,$$

где α — угол конуса штифта.

После всех подстановок, получим:

$$a = 1,522\sqrt[3]{\frac{3\left[\sigma_{\text{см}}\right]l\,\mathrm{tg}\,\alpha R_1R_2\left(E_1 + E_2\right)}{4E_1E_2\left(R_1 + R_2\right)}}. \quad (12)$$

Выражение для упругой деформации взаимодействующих цилиндрических поверхностей запишем [1, 2]:

$$h_{\text{см}} = a_{\text{у}} = 1,231\sqrt[3]{\frac{P^2\left(R_1 + R_2\right)}{E^2R_1R_2}}. \quad (13)$$

С учетом $P = F_{\text{см}}$ выражение (13) примет вид:

$$a_{\text{у}} = 1,231\sqrt[3]{\frac{\left[\sigma_{\text{см}}\right]^2a^2l^2\,\mathrm{tg}\,\alpha\left(R_1 + R_2\right)\left(E_1 + E_2\right)^2}{E_1^2E_2^2R_1R_2}}. \quad (14)$$

После преобразований найдем предельную скорость ударного взаимодействия конуса и фасок отверстия узла, при которой на взаимодействующих поверхностях будут возникать только упругие деформации.

Полученное выражение скорости будет соответствовать предельной скорости подведения кондукторной плиты к собираемому узлу:

$$\mathrm{v}_0 = \sqrt{\frac{4\left[\sigma_{\text{см}}\right]ala_{\text{у}}}{m}}. \quad (15)$$

Для обеспечения требуемой скорости подвода кондукторной плиты к собираемому узлу найдем жесткость пружин *29*, воспользовавшись принципом Доламбера (рис. 4).

Для плоской системы сил с учетом действующих сил запишем:

$$F_{\tau}^{\text{ин}} + G - R_{\text{тр}} - 2F_{\text{пр}_3} = 0.$$

Силу инерции найдем из выражения:

$$F_{\tau}^{\text{ин}} = \frac{G}{g}\frac{\mathrm{v}_0^2}{2S_2} = \frac{2G\left[\sigma_{\text{см}}\right]ala_{\text{у}}}{gS_2m},$$

где S_2 — перемещение кондукторной плиты.

Силу вязкого трения находим из выражения:

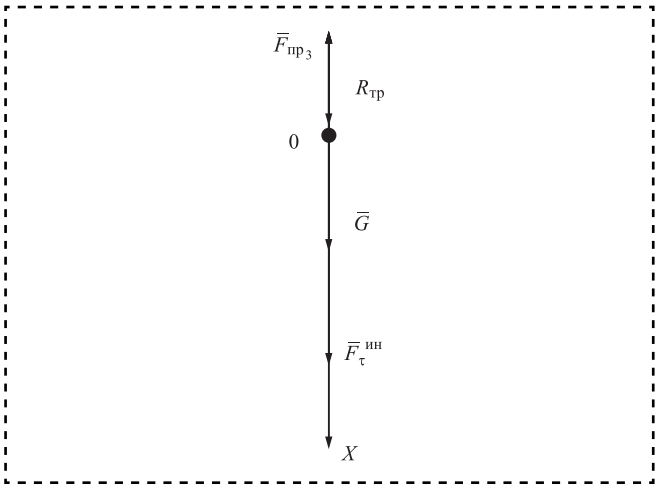


Рис. 4. Расчетная схема

$$R = b\text{v} = b\sqrt{\frac{4[\sigma_{\text{см}}]ala_{\text{у}}}{m}}.$$

Сила пружины *22* направляющих штанг *11*, с учетом предварительного поджатия $\Delta\lambda_2$, равна:

$$F_{\text{пр}_3} = C_3\left(\Delta\lambda_3 + S_3\right).$$

После преобразований найдем жесткость пружины *22* направляющих штанг:

$$C_3 = \left(G + \frac{2G[\sigma_{\text{см}}]ala_y}{gS_2m} - \right.$$
$$\left. -b\sqrt{\frac{4[\sigma_{\text{см}}]ala_{\text{у}}}{m}}\right)\Big/2\left(\Delta\lambda_3 + S_3\right). \quad (16)$$

Движение шпильки по пружинным трубкам (лоткам)

Шпильки выпадают из питателя (условно не показан) в пружинные трубки, выполняющие функции лотков, движутся вниз на позицию завинчивания и упираются в поверхность узла.

Движение шпильки поступательное, следовательно, для изучения ее движения достаточно изучить движение одной точки — центра масс.

Воспользуемся основным уравнением динамики [5]:

$$m\bar{W} = \sum \bar{F}_j, \quad (17)$$

где m — масса шпильки;

$\bar{W}$ — вектор ускорения;

$\sum \bar{F}_j$ — геометрическая сумма сил, действующих на шпильку.

На вертикальном участке движения на шпильку действует вес G, а трением шпильки о поверхность цилиндрической пружины можно пренебречь.

Проектируя уравнение (17) на ось, направленную по направлению движения, с учетом веса шпильки запишем:

$$\frac{G}{g}\ddot{x} = G.$$

Интегрируя это уравнение, получим зависимость скорости движения от времени:

$$\dot{x} = gt.$$

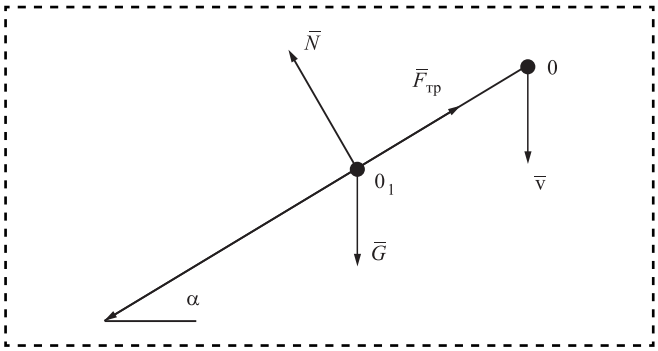


Рис. 5. Расчетная схема

Интегрируя еще раз, получим закон движения шпильки в вертикальной части лотка:

$$x = \frac{gt^2}{2}.$$

Скорость движения шпильки на вертикальном участке лотка запишем:

$$\text{v} = g\sqrt{\frac{2L}{g}}, \quad (18)$$

где L — длина вертикальной части лотка.

Найдем скорость движения шпильки на наклонном участке лотка (рис. 5).

Воспользуемся основным уравнением механики [5]:

$$m\bar{W} = \sum \bar{F}_j, \quad (19)$$

где m — масса шпильки.

С учетом действующих сил в проекции на ось движения уравнение (19) запишем:

$$\frac{G}{g}\ddot{x} = G\sin\alpha - Gf\cos\alpha.$$

После первого интегрирования с учетом начальной скорости получим закон изменения скорости движения шпильки:

$$\text{v} = \frac{g\left(\sin\alpha - f\cos\alpha\right)}{\sin\alpha}t.$$

Опускание плиты держателя с одновременным отводом наконечников подающих трубок из зоны завинчивания шпилек

При выпускании сжатого воздуха из нижней полости удерживающего пневмоцилиндра *14* под действием веса держателя *17*, шпильковертов *13* и

пружины *15* держатель *17* опускается вниз, подводя вращающиеся патроны *19* с разрезными кулачками к свободно расположенным шпилькам *25* во втулках *3* кондукторной плиты *23*.

На первом этапе опускается плита держателя *17*. Кулачки *7*, закрепленные на стержнях *21*, которые жестко связаны с держателем *17*, взаимодействуют со стержнями *6* и поворачивают втулку *24*, отводя наконечники *5* из зоны захвата шпилек патронами с разрезными резьбовыми кулачками.

Поворот втулки опишем дифференциальным уравнением вращательного движения [5]:

$$J_0\bar{\ddot{\varphi}} = \sum \bar{M}^{\text{в}}_{j_0}, \qquad (20)$$

где J_0 — момент инерции относительно центра 0;

$\bar{\ddot{\varphi}}$ — вектор углового ускорения;

$\sum \bar{M}^{\text{в}}_{j_0}$ — геометрическая сумма моментов внешних сил.

Расчетная схема представлена на рис. 6.

Кулачок *7*, расположенный на стержне *21*, действует силой *P* на стержень *6*, поворачивая втулку *24*. Растягиваются пружины *26*, создавая противодействующий момент $M_{\text{пр}}$. Повороту втулки *24* препятствует момент вязкого трения $M_{\text{тр}}$ в подшипниках скольжения.

Спроецируем уравнение (20) на ось вращения и с учетом действующих сил и моментов запишем:

$$J_z\ddot{\varphi} = P'(R+\rho) - 2M_{\text{пр}} - M_{\text{тр}}, \qquad (21)$$

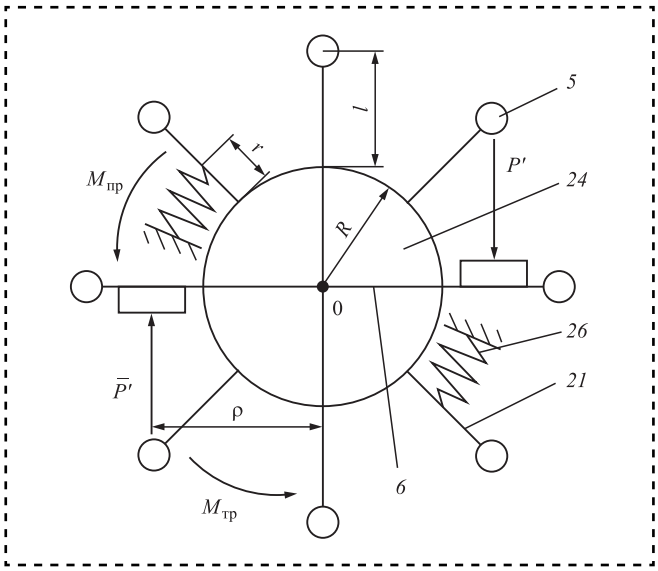


Рис. 6. Расчетная схема:
5 — втулка трубок; *21* — стержень; *24* — втулка; *26* — пружина

где J_z — приведенный момент инерции втулки *24* и стержней *6* к оси вращения втулки;

P' — горизонтальная составляющая от воздействия кулачка на стержень.

Горизонтальная составляющая силы равна:

$$P' = P\cos\alpha,$$

где P — суммарная сила от действия веса держателя *17* и шпильковертов; $P = G_g + nG_{\text{ш}} - F_{\text{пр}_3}$;

G_g — вес держателя;

n — число шпильковертов;

$G_{\text{ш}}$ — вес шпильковерта;

α — угол кулачка.

Момент от силы пружины *26* втулки *24* запишем:

$$M_{\text{пр}} = F_{\text{пр}_5}(R+r),$$

где $F_{\text{пр}_5}$ — сила пружины *26*.

Сила пружины равна:

$$F_{\text{пр}_5} = C_5(\Delta\lambda_5 + S_5),$$

где C_5 — жесткость пружины *28*;

$\Delta\lambda_5$ — предварительная деформация пружины, $\Delta\lambda_5 = \varphi_0(R + r)$;

$\varphi_0 = \text{const}$ — угол поворота втулки при предварительной деформации пружины;

S_5 — деформация пружины при повороте втулки *24* на угол φ, $S_5 = \varphi(R + r)$.

Сила пружины *22* равна:

$$F_{\text{пр}_3} = C_3(\Delta\lambda_3 + S_{\text{к}}), \qquad (22)$$

где $S_{\text{к}}$ — длина дуги поворота стержня *6* при действии кулачка, $S_{\text{к}} = L\sin\alpha$;

L — длина поверхности кулачка при взаимодействии со стержнем *6* втулки *24*, $L = \varphi(R + r)$;

$\Delta\lambda_3$ — предварительное поджатие пружины.

Момент от сил вязкого трения пропорционален угловой скорости вращения $\dot{\varphi}$:

$$M_{\text{тр}} = b\dot{\varphi}, \qquad (23)$$

где b' — коэффициент вязкого трения при вращении.

Подставив в дифференциальное уравнение (21) составляющие параметры, окончательно запишем:

$$J_z\ddot{\varphi} = \left[G_g + nG_{\text{ш}} - C_3\left(\Delta\lambda_3 + \varphi(R+r)\sin\alpha\right)\right]\times \\ \times\cos\alpha(R+\rho) - 2C_5\left[\Delta\lambda_5 + \varphi(R+r)\right](R+r) - b'\dot{\varphi}. \qquad (24)$$

Преобразуем уравнение (24):

$$\ddot{\varphi} + \frac{b}{J_z}\dot{\varphi} + \frac{1}{J_z}\left[C_3(R+r)(R+\rho)\sin\alpha\cos\alpha - 2C_5(R+r)^2\right]\varphi = \\ = \frac{1}{J_z}\left[\left(G_g + nG_{ш} - C_3\Delta\lambda_3\right)\cos\alpha\left(R+\rho\right) - 2C_5\Delta\lambda_5\left(R+\rho\right)\right]. \quad (25)$$

Введем обозначения:

$2n$ — коэффициент при $\dot{\varphi}$ (n — приведенный коэффициент сопротивления);

k^2 — коэффициент при φ (k — круговая или собственная частота колебаний);

A — правая часть уравнения (25).

Уравнение (25) примет вид:

$$\ddot{\varphi} + 2n\dot{\varphi} + k^2\varphi = A.$$

Получено линейное дифференциальное уравнение с правой частью в виде постоянного члена.

Решение уравнения найдем в виде суммы решений однородного уравнения — $\varphi^{(1)}$ и частного решения данного уравнения — $\varphi^{(2)}$:

$$\varphi = \varphi^{(1)} + \varphi^{(2)}.$$

При $k > n$, т.е. имеет место малое сопротивление при нулевых начальных условиях:

$$t = 0;\ \varphi_0 = 0;\ \dot{\varphi}_0 = 0.$$

В результате решения получим выражение предельной скорости поворота втулки *24*:

$$\dot{\varphi} = nl^{-nt}\frac{A}{k^2}\left(\cos k^*t + \frac{n}{k^*}\sin k^*t\right) + \\ + l^{-nt}\frac{A}{k^2}(k^*\sin k^*t - n\cos k^*t), \quad (26)$$

где k^* — круговая частота с учетом сопротивления, $k^* = \sqrt{k^2 - n^2}$.

Выводы

1. Представлена универсальная кинематическая схема многошпиндельного шпильковерта в составе автоматизированного комплекса одновременного завинчивания нескольких шпилек, испытанная в условиях производства.

2. Обоснованы предельные режимы подачи узла на позицию сборки шаговым конвейером и подвода исполнительного органа устройства к собираемому узлу с возникновением на взаимодействующих поверхностях элементов устройства при ударах только упругих деформаций.

3. Определены жесткости пружин, при которых будут возникать на взаимодействующих поверхностях только упругие деформации.

Библиографический список

1. **Демидов С.Н.** Теория упругости: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 432 с.

2. **Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И.** Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

3. **Автоматизация** производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 656 с.

4. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Динамика движения элементов механизмов при упругом и упругопластическом ударах о неподвижные и подвижные тела. Ковров: КГТА им. В.А. Дегтярева, 2014. 80 с.

5. **Яблонский А.А.** Теоретическая механика. М.: Высшая школа, 1971. 488 с.

УДК 620.191.355

Д.В. Жуков
(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, ООО "Газпром трансгаз Самара"),
С.В. Коновалов, *д-р техн. наук*
(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева),
А.В. Афанасьев *(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева, ООО "Газпром трансгаз Самара")*
E-mail: dzetii@mail.ru

Особенности диагностики заводских дефектов труб, развивающихся при эксплуатации

Проведен анализ металлургического дефекта, идентифицированного при проведении полевого неразрушающего контроля как закат глубиной до 5 мм (более половины толщины стенки трубы). Фактические параметры и характеристики дефекта, определенные методами неразрушающего контроля и металлографии в лабораторных условиях, сопоставлены с выводами, сделанными на основе полевых измерений дефектного участка трубы. Даны рекомендации по корректировке технологии полевого неразрушающего контроля заводских дефектов труб, находящихся в эксплуатации.

The analysis of the metallurgical defect identified during the field non-destructive testing as a lamination with a depth of up to 5 mm (more than half of the pipe wall thickness) was carried out. The actual parameters and characteristics of the defect, determined by the methods of non-destructive testing and metallography in laboratory conditions, are compared with the conclusions made on the basis of field measurements of the defective pipe section. Conclusions and recommendations on the adjustment of field non-destructive testing technology of defects of pipes are given.

Ключевые слова: неразрушающий контроль, ультразвуковая толщинометрия, магнитопорошковая дефектоскопия, световая оптическая микроскопия, металлография, металлургические дефекты труб, магистральные газопроводы.

Keywords: non-destructive testing, ultrasonic thickness measurement, magnetic particle inspection, light optical microscopy, metallography, metallurgical defects of pipes, main gas pipelines.

Введение

Конструктивные дефекты и дефекты материала труб занимают третье место по числу инцидентов на газопроводах и составили 17,79 % за 2007—2018 гг. [1]. Магистральные газопроводы (МГ) относят к производственным объектам I класса опасности. Эксплуатация МГ должна обеспечивать их максимальную промышленную безопасность и надежность. В соответствии с требованиями Федерального законодательства на МГ должен быть обеспечен контроль технического состояния с применением необходимых методов технического диагностирования [2].

Объемы и методы контроля, нормы оценки качества труб, применяемых на МГ, изложены в инструкции [3], критерии и правила ремонта или замены дефектных труб приведены в правилах [4].

В данной работе учтены ранее проведенные исследования дефектов проката, таких как вкатанная окалина [5], раскатной пригар [6], плена [7]. Результаты металлографических исследований сопоставлены с выводами работы [8], где проведен анализ поверхностных дефектов заготовок горячекатаного проката.

Цель работы — проверка выводов, изложенных в техническом акте по результатам диагностического обследования объекта. В работе определены фактические параметры и характеристики дефекта (заката глубиной до 5 мм). Даны рекомендации по корректировке технологии проведения неразрушающего контроля подобных заводских дефектов.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Обнаружен дефект на трубе из стали 17Г1С наружным диаметром 530 мм и номинальной толщиной 9 мм. Для лабораторных исследований из трубы вырезали пластину размером 150×30 мм. Провели визуально-измерительный контроль и ультразвуковую толщинометрию пластины с наружной и внутренней сторон [3], в зоне дефекта — магнитопорошковую дефектоскопию; визуально-измерительный контроль — на срезе образца. После неразрушающего контроля зону дефекта на образце удалили методом контролируемой шлифовки [4] и повторно выполнили контроль методами ультразвуковой толщинометрии толщинометром "Булат 1S" с ультразвуковым преобразователем П112-5-10/2-А-01 (диапазон измеряемых толщин 1,5...75 мм) и магнитопорошковой дефектоскопии с использованием материалов фирмы Magnaflux и магнита ярмового электрического "Магвел-220М/16МА".

Рассчитали минимальную допустимую толщину стенки трубы [10] для заданных условий эксплуатации и допустимую глубину сошлифовки в соответствии с отраслевыми требованиями [4].

Для уточнения свойств и характеристик металла трубы провели металлографические исследования. Образцы размером 34×10 мм вырезали из дефектной и бездефектной зон перпендикулярно к направлению отслоения, совпадающим с осью трубы, с обеспечением охлаждения.

Для подготовки микрошлифов образцы заливали в смолу для "холодного" прессования TECHNOVIT 4006 и поэтапно шлифовали на карбидокремниевой шлифовальной бумаге различной зернистости. Окончательную полировку провели на фетровом круге с алмазной суспензией, размер фракции около 1 мкм (рис. 1 на стр. 2 обложки). Для выявления микроструктуры после шлифовки и полировки шлифы протравливали в 4%-ном растворе азотной кислоты в спирте. Шлифы образцов, включая место зарождения трещины, исследовали методом световой оптической микроскопии с увеличением 50...500 раз на бинокулярном оптическом микроскопе Neophot 2.

Неразрушающий контроль исходного образца

Визуально-измерительный контроль среза образца показал отслоение, направленное параллельно поверхности трубы. Под отслоением плотный слой продуктов коррозии. Визуально-измерительный контроль не выявил распространения трещины в глубину стенки трубы (рис. 2 на стр. 2 обложки). По внешним признакам дефект соответствует закату [9].

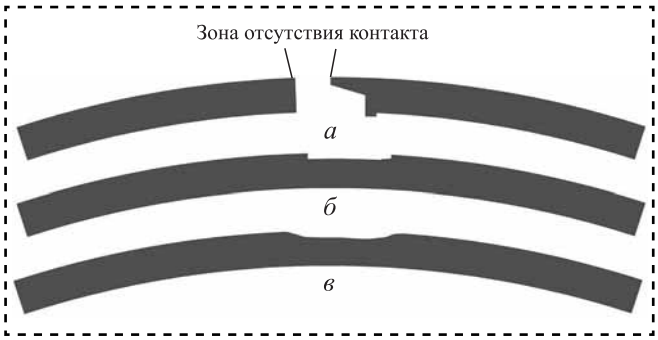


Рис. 3. Толщинограмма измерений:
а — наружная поверхность образца; *б* — внутренняя поверхность образца; *в* — зашлифованная дефектная зона

Таблица 1
Результаты ультразвуковой толщинометрии образца

Сторона контроля	Толщина, мм					
	Дефектная зона			Бездефектная зона		
	min	max	Средняя	min	max	Средняя
Внешняя	2,5	5,5	4,0	9,1	9,6	9,2
Внутренняя	8,0	8,3	8,2	9,2	9,4	9,3

Выполнили пошаговую ультразвуковую толщинометрию с внешней и внутренней сторон образца трубы. Шаг измерений 1 мм. Сводные результаты ультразвуковой толщинометрии приведены в табл. 1, по результатам пошаговых измерений построены толщинограммы (рис. 3).

Толщинометрия с обратной стороны образца не выявила несплошностей внутри стенки трубы (рис. 4 на стр. 2 обложки).

Контролируемая шлифовка и последующий неразрушающий контроль

Перед контролируемой шлифовкой дефектной зоны провели осмотр поверхности трубы под отслоением. Так как продукты коррозии имеют гораздо больший объем, чем исходная масса металла, их наращивание вследствие коррозионных процессов привело к видимому глазом отслоению прикатанного слоя ме-

талла от тела трубы в местах выхода отслоения на поверхность (рис. 5 на стр. 2 обложки). При очистке поверхности трубы от коррозии обнаружены каверны в теле трубы глубиной до 0,5 мм (рис. 6 на стр. 2 обложки). Провели шлифовку поверхности в зоне дефекта до полной ликвидации всех видимых дефектов поверхности (рис. 7 на стр. 2 обложки).

Различия в показаниях толщины при пошаговой толщинометрии образца с обеих сторон составили не более 0,1 мм. Минимальная толщина в зашлифованной зоне — 7,8 мм. Построена толщинограмма отшлифованного образца (см. рис. 3, *в*). Остаточная толщина образца сопоставима с результатами, полученными при контроле с внутренней стороны. Незначительное уменьшение связано с утонением в результате зашлифовки коррозионных язв на поверхности. Выявлено, что замер толщины снаружи образца через поверхностное отслоение дает некорректные результаты из-за плотного слоя продуктов коррозии, образованных под отслоением.

Магнитопорошковая дефектоскопия образца на зашлифованной поверхности и в прилегающей зоне не выявила поверхностных или подповерхностных трещин. Отсутствие индикаторных следов показывает, что дефектная область убрана, подтверждения ухода трещины на глубину более 2 мм не зафиксировано.

Средства неразрушающего контроля не подтвердили глубину дефекта 5 мм, указанную в техническом акте по результатам диагностического обследования объекта.

Прочностной расчет по толщине стенки

Для определения допустимости остаточной толщины стенки трубы провели расчет минимально допустимой толщины стенки в соответствии с отраслевым стандартом СП 36.13330.2012 [10]:

$$\delta = \frac{npD_{н}}{2\left(R_1 + np\right)},$$

где n — коэффициент надежности по нагрузке, n = 1,1 (в соответствии с таб. 14 [10]);

p — рабочее (нормативное) давление, p = = 2,5 МПа (согласно паспорту объекта);

$D_{н}$ — наружный диаметр трубы, $D_{н}$ = 53 см;

R_1 — расчетное сопротивление растяжению:

$$R_1 = \frac{R_{н}^{1} m}{k_1 k_n};$$

m — коэффициент условий работы трубопровода, m = 0,66 (в соответствии с табл. 1 [10]);

$R_{н}^{1}$ — нормативное сопротивление растяжению, равное минимальному значению временного сопротивления на трубы, $R_{н}^{1}$ = 570 МПа (по данным из сертификата);

k_1 — нормативный коэффициент надежности по материалу, k_1 = 1,4 (в соответствии с табл. 10 [10]);

$k_{н}$ — коэффициент надежности по ответственности трубопровода, $k_{н}$ = 1,1 (в соответствии с табл. 12 [10]);

$$R_1 = \frac{570 \cdot 0,66}{1,4 \cdot 1,1} = 244,286.$$

Минимальная толщина стенки должна быть не менее 1/100 $D_{н}$, что составляет 5,3 мм, и на 2,5 мм меньше остаточной толщины, полученной в результате контролируемой шлифовки.

Металлографические исследования

На поперечном шлифе, изготовленном из исследуемого фрагмента, видно, что обнаруженный дефект начинается под острым углом к поверхности трубы, затем развивается параллельно поверхности трубы (рис. 8). Вершина дефекта острая, разветвляющаяся в одном направлении, параллельном поверхности. Дополнительных трещин, распространяющихся внутрь тела трубы, не обнаружено.

На рис. 9 представлена феррито-перлитная структура образца, значительные посторонние включения отсутствуют. Количественный

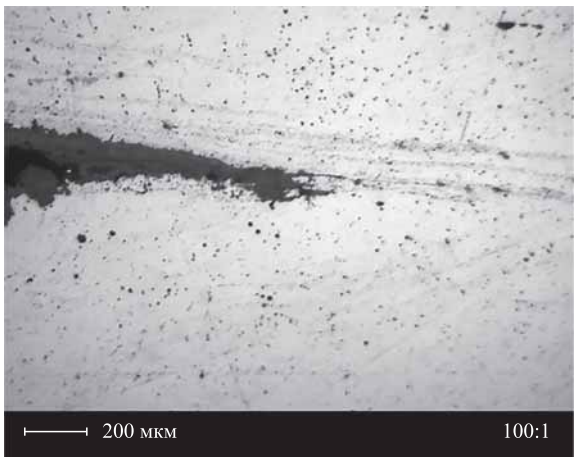


Рис. 8. Развитие трещины, параллельное поверхности трубы

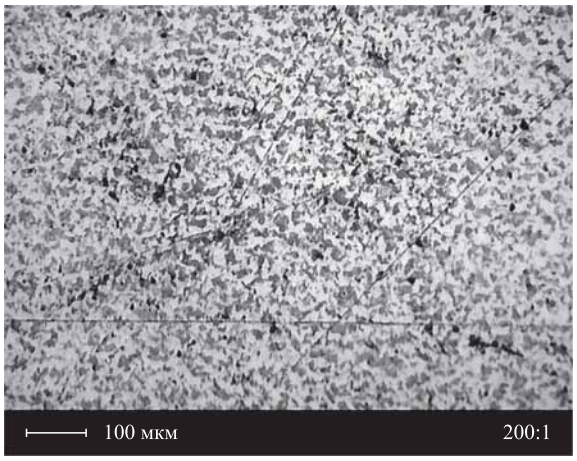


Рис. 9. Микроструктура шлифа

Таблица 2

Количественный фазовый анализ стали по методу Розиваля

Фаза	Результаты измерений										Среднее арифметическое
Феррит	76	73	75	77	74	76	75	77	72	74	74,9

фазовый анализ проведен по линейному методу Розиваля: по объемной доле преобладает феррит примерно 75 %, перлита около 25 % (табл. 2).

На рис. 10 видна линия заката, внешний вид которого соответствует полученным в работе [8] выводам, идентифицирующим данный дефект как закат от вкатывания подреза. По данным металлографического исследования отмечен обезуглероженный слой металла, что характерно для дефектов проката такого рода [9].

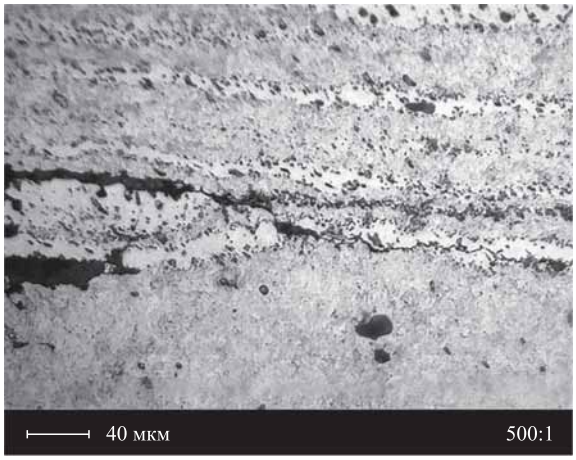


Рис. 10. Прикатанная линия заката

Выводы

1. Исследуемый образец содержит производственный дефект, классифицируемый как закат. Глубина дефекта не превышает 1,5 мм, коррозионные язвы, образовавшиеся под отслоением дефекта от трубы в процессе эксплуатации, имеют глубину до 0,5 мм. Развитие дефекта направлено параллельно поверхности трубы.

2. Уменьшение толщины стенки трубы после полной зашлифовки дефектной области не превышало 1,8 мм (18,75 % от толщины стенки).

3. Результаты неразрушающего контроля, ограниченные визуально-измерительным контролем и ультразвуковой толщинометрией, не дают правильной оценки глубины распространения дефектов типа "закат". Для определения подробных характеристик трещиноподобных дефектов, в частности определения их глубины, требуется проведение дополнительных методов неразрушающего контроля, например, ультразвукового контроля при помощи наклонных преобразователей.

Библиографический список

1. **EGIG (2018).** 10th report of the gas pipeline incidents of european gas pipeline incident data group (period 1970—2016). [Электронный ресурс]. URL: https://www.egig.eu/.

2. **Приказ** Ростехнадзора от 06.11.2013 № 520 "Об утверждении Федеральных норм и правил в области промышленной безопасности "Правила безопасности для опасных производственных объектов магистральных трубопроводов" (Зарегистрировано в Минюсте России 16.12.2013 № 30605).

3. **Инструкция** по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов. М.: ОАО "Газпром", 2013. 117 с.

4. **Правила** назначения методов ремонта дефектных участков линейной части магистральных газопроводов единой системы газоснабжения ОАО "Газпром": Р Газпром 2-2.3-595—2011 / Науч.-исслед. ин-т природ. газов и газовых технологий-Газпром ВНИИгаз. Введ. с 2012-06-11. М.: Газпром экспо, 2012. 47 с.

5. **Идентификация** дефекта поверхности листового проката типа "вкатанная окалина" / А.Б. Сычков и др. // Моделирование и развитие процессов ОМД. 2018. № 24. С. 12—18.

6. **Шинкин В.Н.** Разрушение стальных труб большого диаметра при дефекте раскатной пригар // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 6. С. 436—442.

7. **Неметаллические** включения и природа дефектов холоднокатаного листа. Часть 1. Дефект "плена" / А.А. Казаков и др. // Черные металлы. 2006. № 6. С. 32—37.

8. **Филиппов А.А., Пачурин Г.В.** Анализ поверхностных дефектов заготовок горячекатаного проката для холодной высадки метизов // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 5. С. 35—37.

9. **ГОСТ 21014—88.** Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности. М.: Изд-во стандартов. 1995.

10. **СП 36.13330.2012.** Магистральные трубопроводы. Актуализированная редакция СНиП 2.05.06—85* (с Изменением № 1). М.: Проспект, 2016. 114 с.

УДК 629.4

П.В. Губарев, Н.Р. Тептиков, А.С. Шапшал, *канд-ты техн. наук,*
И.С. Морозкин, *д-р техн. наук,* **И.В. Больших**
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
E-mail: glazunovdm@yandex.ru

Методика проведения тяговых испытаний локомотивов

Рассмотрены этапы проведения эксплуатационных испытаний локомотивов. Предложена методика проведения тяговых испытаний локомотивов, необходимая для определения и проверки тяговых качеств и экономичности локомотивов, характеристик их основных узлов и проверки системы управления. Представлены основные параметры расчета методики. Детально разобран порядок проведения тяговых испытаний пассажирского электровоза ЭП20 и грузового электровоза ВЛ80С.

The stages of operational testing of locomotives are described. The method of carrying out traction tests of locomotives necessary for determination and check of traction qualities and efficiency of locomotives, characteristics of their main units and check of control system is offered. The main parameters of the method calculation are considered. Details are presented in the order of carrying out of traction tests of passenger and freight electric locomotive EP20 electric locomotive VL80S.

Ключевые слова: локомотив, испытания, методика, параметры, порядок, этап, расчет, узел, экономичность.

Keywords: locomotive, tests, methods, parameters, order, stage, calculation, unit, efficiency.

Эксплуатационные испытания локомотивов проводят в реальных условиях железных дорог с поездами. Весь цикл эксплуатационных испытаний локомотивов можно разбить на следующие этапы: планирование испытаний, выбор опытного локомотива (установочной серии), стационарные испытания, контрольно-наладочные поездки, опытные поездки с поездами, обработка опытных данных. Планирование испытаний проводится до начала эксплуатационных испытаний и заключается в следующих мероприятиях: разработка плана испытаний; организация учета и получения результатов испытаний; выбор методов статистической обработки информации. План испытаний разрабатывается в соответствии с числом испытываемых, подконтрольных локомотивов. При этом устанавливаются алгоритм проведения испытаний и критерии их прекращения. Планирование испытаний предусматривает определение необходимого объема испытаний для вычисления контролируемых параметров и показателей, а также оценки погрешности измерений и достоверности опытов [1—4].

Тяговым испытаниям подвергают: опытные образцы новых серий локомотивов, чтобы по результатам оценки параметров этих образцов можно было дать право на запуск серийного производства; модернизированные локомотивы, у которых изменена масса и скорость движения; локомотивы после заводской наладки и установленного пробега (могут быть частью приемочных испытаний).

Анализ работы электрооборудования электровозов показывает, что наиболее часто при эксплуатации выходят из строя тяговые двигатели, вспомогательные машины и другие узлы электровозов. Для повышения надежности работы электрооборудования на электровозоремонтных заводах необходимо постепенное внедрение нового диагностического оборудо-

вания и новых методов диагностики и испытаний локомотивов.

Предлагаемая методика проведения тяговых испытаний локомотивов относится к области транспорта, в частности к тяговым испытаниям локомотивов, проводимых для определения и проверки тяговых качеств и экономичности локомотивов, характеристик их основных узлов и проверки системы управления. Испытания служат также для снятия и проверки характеристик локомотивов, необходимых для нормирования веса поезда и тяговых расчетов.

Рассмотрим основные параметры для расчета методики проведения тяговых испытаний локомотивов.

Необходимую номинальную мощность тягового двигателя ведущего электровоза рассчитывают по формуле:

$$P_{д} = \frac{F_{к}v}{3,6N_0\eta},$$

где η — коэффициент полезного действия тягового редуктора;

$F_{к}$ — касательная сила тяги ведущего электровоза;

v — скорость ведущего электровоза;

N_0 — число осей ведущего электровоза.

Ток тягового двигателя

$$I_{дн} = \frac{1000P_{дн}}{U_{дн}\eta_{дн}},$$

где $U_{дн}$ — номинальное напряжение, подаваемое на тяговый двигатель, В;

$\eta_{дн}$ — коэффициент полезного действия тягового двигателя в номинальном режиме.

Сила тяги электровоза:

$$F_{к} = N_0F_{д} = 3,6N_0\frac{P_{д}\eta}{v}.$$

На рис. 1 представлена тяговая характеристика ведущего электровоза ЭП20.

Тормозную силу из условия ограничения по мощности на валах тяговых двигателей определим по формуле:

$$B_{к} = N_0\frac{3,6P_{дн}}{\eta v}.$$

График $B_{к} = f(v)$ ведомого электровоза ЭП20 представлен на рис. 2.

Испытания локомотивов проводят на кольцевой железной дороге (например, ВНИИЖТ или НЭВЗ) [5].

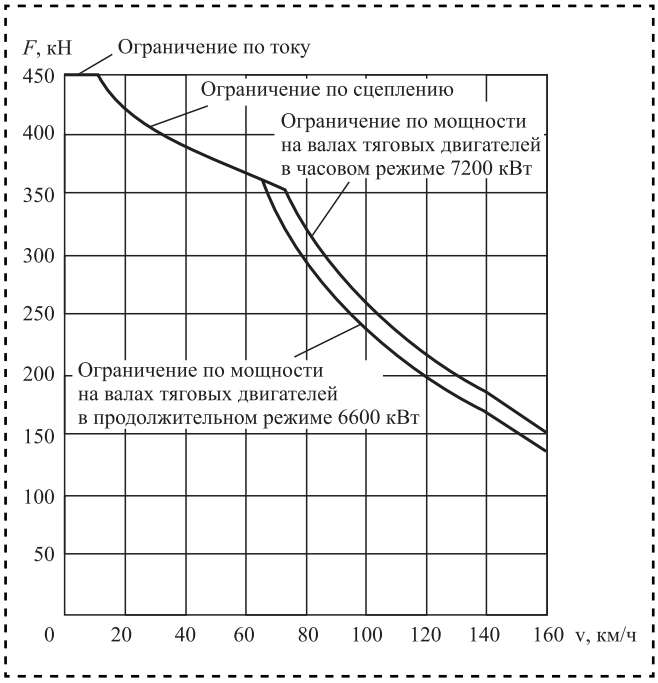


Рис. 1. Тяговые характеристики электровоза ЭП20

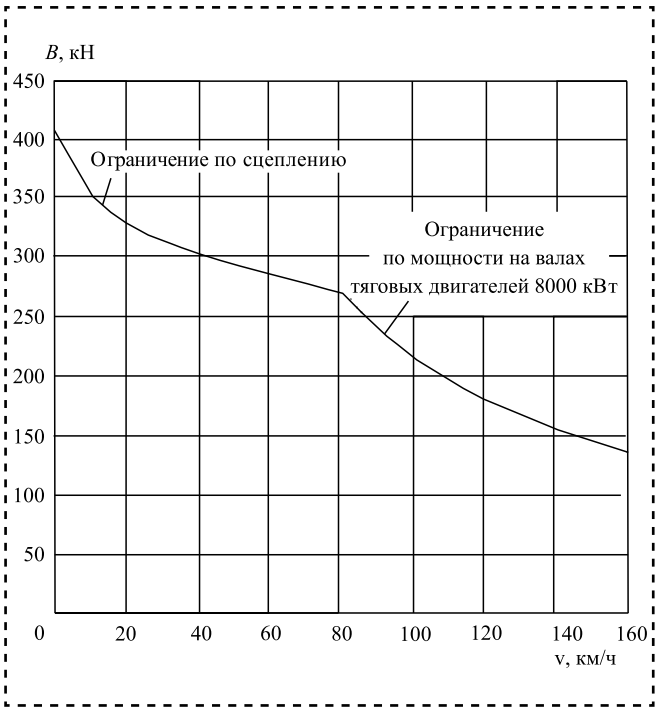


Рис. 2. Тормозные характеристики электровоза ЭП20 при рекуперации

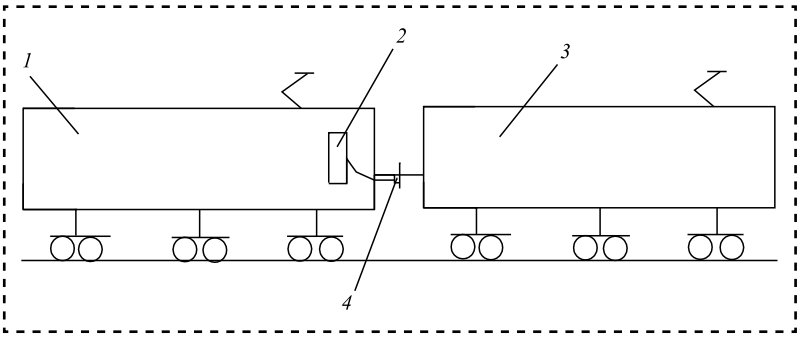


Рис. 3. Схема тяговых испытаний электровоза ЭП20:
1 — ведущий электровоз; *2* — компьютер; *3* — ведомый электровоз; *4* — датчик силы тяги

Рис. 4. Датчик динамической силы ICP модель 208C02

Авторы предлагают следующую методику тяговых испытаний локомотивов после постройки или ремонта:

— провести зацепление двух локомотивов, один из которых может быть ведущим другой ведомым (рис. 3);

— на ведущем локомотиве создать режим тяги, на ведомом — режим электрического торможения;

— на автосцепке ведущего локомотива провести монтаж датчика силы;

— в задней кабине ведущего локомотива установить компьютер с программным обеспечением и связать с датчиком силы;

— на ведущем локомотиве обеспечить превышение силы тяги над силой электрического торможения ведомого локомотива на 10 кН;

— проводить движение локомотивов по испытательному кольцу с замерами силы тяги в задней кабине ведущего локомотива;

— поменять режим работы локомотивов и повторить испытания.

Для замера силы тяги используется датчик динамической силы ICP со встроенной электроникой (например, модель 208C02) (рис. 4).

Технические характеристики датчика динамической силы ICP модели 208C02 позволяют проводить замеры силы тяги в реальных условиях эксплуатации локомотивов.

Технические характеристики датчика динамической силы ICP марки 208C02

Чувствительность, мВ/Н	11,24
Диапазон сил сжатия/растяжения, Н	444,8
Максимальная нагрузка сжатия/ растяжения, Н	2669/2224
Разрешение, Н (СКЗ)	0,004
Частотный диапазон, Гц	0,001—36 000
Нелинейность, %	⩽1
Температурный диапазон, °С	−54...+121
Температурный коэффициент чувствительности, %/°С	< 0,09
Спектральный шум, Н/$\sqrt{\text{Гц}}$	
1 Гц	$6{,}03\cdot10^{-4}$
10 Гц	$1{,}23\cdot10^{-4}$
100 Гц	$4{,}27\cdot10^{-5}$
1000 Гц	$9{,}46\cdot10^{-6}$
Полярность	Положительная
Жесткость, кН/мкм	1,05
Материал корпуса	Коррозионностойкая сталь
Габаритные размеры, мм	15,8×12,7
Масса, г	22,7
Разъем Coaxial Jack	10—32
Расположение разъема	Боковой
Крепление "розетка"	10—32

В датчике динамической деформации используется кварцевый чувствительный элемент, размещенный в прочном титановом корпусе. Устройство многоразового применения крепится в задней кабине ведущего локомотива при помощи связующего. После проведения испытаний датчик снимают и повторно используют при следующих испытаниях.

Порядок испытания пассажирских электровозов ЭП20:

1. Провести автосцепление двух электровозов.

2. Подготовить схемы электровоза № 1 для тягового режима.

3. Подготовить схемы электровоза № 2 для рекуперативного тормозного режима.

4. Привести в движение электровоз № 1, набрав скорость 80 км/ч (сила тяги 320 кН, см. рис. 1).

5. Другая локомотивная бригада в этот момент на электровозе № 2 проводит электрическое рекуперативное торможение силой 270 кН (см. рис. 2).

6. При скорости 80 км/ч проверить показания данных компьютера, где сила торможения должна составить 25 тс (250 кН).

7. Осмотреть на ходу движения и потом вторично на стоянке на предмет подгаров и других повреждений цепи электрического торможения электровоза № 2.

8. Повторить пп. 1—7 для электровоза № 1 в электрическом торможении.

Порядок испытания грузовых электровозов, например ВЛ80С:

1. Провести автосцепление двух электровозов.

2. Подготовить схемы электровоза № 1 для тягового режима.

3. Подготовить схемы электровоза № 2 для электрического тормозного режима.

4. Привести в движение электровоз № 1, набрав до 25-й позиции (скорость 80 км/ч и ток тяговых двигателей 300 А).

5. Другая локомотивная бригада в этот момент на электровозе № 2 проводит электрическое реостатное торможение, выставив ток возбуждения 800 А.

6. При скорости 80 км/ч проверить показания данных компьютера, где сила торможения должна составить 25 тс (250 кН).

7. Осмотреть на ходу движения и потом вторично на стоянке на предмет подгаров и других повреждений цепи электрического торможения электровоза № 2.

8. Повторить пп. 1—7 для электровоза № 1 в электрическом торможении.

Достоинства предлагаемой методики проведения тяговых испытаний локомотивов:

— для проведения испытаний не нужен дорогостоящий вагон-лаборатория (вагон-лаборатория с финансовой точки зрения практически недоступен для депо и ремонтных заводов);

— новый локомотив или локомотив после ремонта проверяется под нагрузкой, в результате чего выявляются малонадежные узлы;

— на ведомом локомотиве одновременно проверяется работа электрического тормоза.

Выводы

Разработана методика проведения тяговых испытаний грузовых и пассажирских локомотивов, позволяющая определить малонадежные узлы и исключить использование дорогостоящих вагонов-лабораторий.

Приведены алгоритмы проведения испытаний пассажирского и грузового локомотивов на примере ЭП20 и ВЛ80С.

Библиографический список

1. **Тептиков Н.Р., Резниченко А.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В.** Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 1. С. 13—15.

2. **Оценка** безотказности и готовности локомотивов в период нормальной эксплуатации / А.А. Резниченко и др. // Уральский государственный университет путей сообщения. 2018. № 3 (39). С. 15—22.

3. **Глазунов Д.В.** Визуализация ротапринтного метода смазывания гребней колес подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2018. № 7. С. 70—72.

4. **Губарев П.В., Глазунов Д.В., Мищихина Е.С.** Анализ системы ремонта и диагностики локомотивов по фактическому состоянию // Тр. международной научно-практической конференции "Транспорт—2013". Ростовский государственный университет путей сообщения. 2013. С. 143—144.

5. **Железнодорожный** транспорт: энциклопедия / гл. ред. Н.С. Конарев. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. С. 469—470.

УДК 539.21; 539.621

М.В. Ноженков, *д-р техн. наук (ЗАО "Техном-Т", Москва)*
E-mail: technomt@technom-t.ru

Вихревые структуры роста кристаллов*

Проведены исследования влияния технологии получения на свойства покрытий, наносимых ионно-плазменными методами. Обнаружена зависимость вихревого движения частиц в процессе нанесения на кристаллическую структуру и свойства получаемого вещества. Установлена возможность создания конденсированной среды с вихревыми квантовыми потоками частиц, движущимися без рассеяния энергии по эквипотенциальным поверхностям среды в виде подобных явлений (сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести, роста кристаллов в вакууме). Предложена модель роста кристаллов при нанесении покрытий.

The technology of obtaining coatings applied by ion-plasma methods has been studied. The dependence of the vortex motion of particles in the deposition process on the crystal structure and properties of the obtained substance is found. The possibility of creating a condensed medium with vortex quantum flows of particles moving without scattering of energy along equipotential surfaces of the medium in the form of similar phenomena (super low friction, superconductivity, superfluidity, crystal growth in a vacuum) is established. A crystal growth model is proposed for the application of coatings.

Ключевые слова: ионно-плазменные покрытия, вакуум, частица, атом, рост кристаллов, электронографические и электронно-микроскопические исследования, сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, потоки без диссипации энергии, броуновское движение, подобие, вихревое поле.

Keywords: ion-plasma coatings, vacuum, particle, atom, crystal growth, electron diffraction and electron microscopy, superlow friction, superconductivity, superfluidity, flows without energy dissipation, Brownian motion, similarity, vortex field.

Введение

Свойства веществ во многом определяются кристаллической структурой, которая формируется в процессе их получения, поэтому весьма перспективна разработка технологий нанесения покрытий вакуумными ионно-плазменными методами и установление взаимосвязи процессов роста покрытий с заданными свойствами. Процессы формирования анизотропных слоев вещества с вихревыми потоками веществ, движущихся без диссипации энергии, возможны при выращивании кристаллов в виде слоев в специальных устройствах с заданными параметрами. Вещества с анизотропной структурой обладают рядом необычных свойств и находят применение для получения сверхпроводимости и сверхнизкого трения [1—3]. Свойства вещества определяются технологическими процессами его получения.

Цель работы — создание вихревой модели роста кристаллических структур как диссипативной системы конденсированной среды с квантовыми потоками частиц, формирующихся в виде круговых потоков с двумя перпендикулярными осями кристаллизации. Такие покрытия дают возможность создания конденсированной среды с квантовыми потоками частиц, движущимися без рассеяния энергии в отсутствии сил взаимодействия по эквипотенциальным поверхностям тела в виде сверхнизкого трения, сверхпроводимости, сверхтекучести.

Объекты и методы исследований

Покрытия на основе переходных металлов IV—VI групп Периодической системы (оксиды хрома, нитриды молибдена и алюминия, дихалькогениды молибдена и вольфрама

* По материалам доклада на конференции "Трибология — машиностроению—2016".

(MoS_2, $MoSe_2$, WS_2 и WSe_2)) наносили вакуумными ионно-плазменными методами [4—12]. Триботехнические испытания проводили на воздухе при нормальных условиях на машинах трения УГС-1 по схеме "диск—сфера" (диаметр сферы 9,0 мм; удельная нагрузка 10^5 Н/см^2; скорость скольжения постоянная и равна 0,019 м/с). Проведение триботехнических исследований на воздухе создает интенсивные условия эксплуатации, так как высокие антифрикционные свойства и большая долговечность дихалькогенидов проявляются в вакууме и инертных средах. Покрытия наносили при температурах подложки 283...1573 К на полированные образцы компактной керамики Al_2O_3. Структуру покрытий исследовали методом дифракции электронов на отражение в электронографе ЭМР-102М, морфологию поверхности — с помощью электронных микроскопов JXA-841 и JSM-35C, а элементный состав полученных покрытий — методами спектроскопии характеристического рентгеновского излучения (JEM-100C с приставкой CEVEX) и рентгеновской фотоэмиссионной спектроскопии (ESCALAB-5) [4—12].

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Исследовали влияние технологических параметров нанесения покрытий вакуумными ионно-плазменными методами на структуру и триботехнические свойства покрытий из дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2) [1]. Поток распыленного вещества распределялся по закону Ламберта (косинуса) (рис. 1).

Исследовали влияние температуры подложки и размещения образцов в центре либо на периферии платы держателя подложек на кристаллическую структуру покрытия. Установлено, что при изменении температуры подложки формируются покрытия с гексагональной структурой 2H-MoS_2 и ориентациями кристаллитов с осями $[10\bar{1}0]$, перпендикулярными к поверхности подложки (для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2 при 473...973 К) и $[11\bar{2}0]$ (для MoS_2 при 673...773 К) (рис. 2 и 3). Наименее низкая температура кристаллизации у покрытий из MoS_2, наиболее высокая у WSe_2 (рис. 3). Вблизи центра платы текстуры роста с осью $[10\bar{1}0]$ наблюдали у всех дихалькогенидов, тогда как текстура с $[11\bar{2}0]$ обнаружена у покрытий из MoS_2 при 673...773 К (см. рис. 1, *в*). При этом ось [0001] полностью разориентирована в плоскости, параллельной поверхности подложки. Совпадение направления пучка электронов в колонне электронографа с радиус-вектором из центра платы приводит к возникновению симметричной дифракционной картины, причем при параллельном перемещении образца под пучком вид картины остается неизменным (см. рис. 1, *а* и 2, *а*). При удалении на периферию происходило плавное возникновение второй текстуры с ориентацией оси [0001] параллельно поверхности с сохранением одновременно ориентации оси $[10\bar{1}0]$

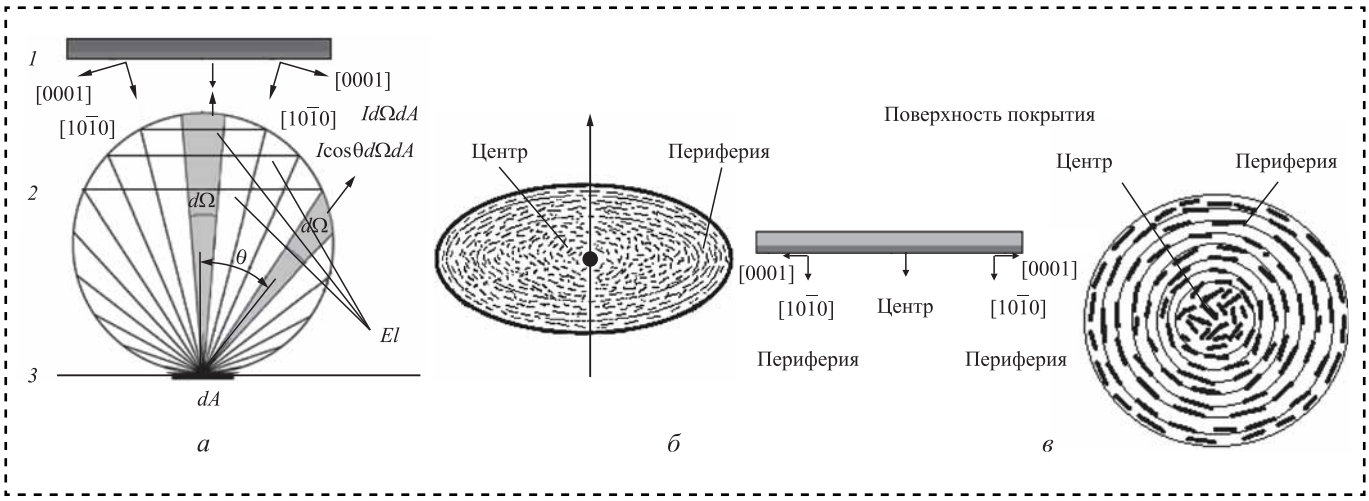


Рис. 1. Схема нанесения (*а*) и вид поверхности покрытия сбоку под углом (*б*), сбоку и сверху (*в*):
El — линии равной плотности потока распыленного вещества; *1* — плата с образцами и растущем на них покрытием; *2* — распределение распыленного вещества по закону Ламберта (косинуса); *3* — распыляемая мишень

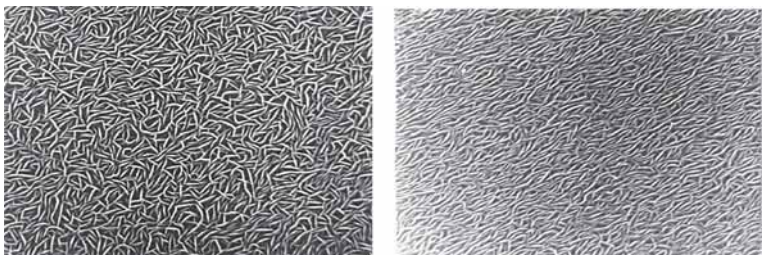
перпендикулярно поверхности подложки (см. рис. 1, *б*) [4—12].

Полученные результаты подтверждают исследования морфологии поверхности покрытия (см. рис. 2, *б*). На рисунке видно, что кристаллиты ориентируются практически правильно с небольшим угловым разбросом, что обеспечивает формирование дифракционной картины типа текстуры. При этом кристаллиты при удалении от центра платы образуют замкнутые концентрические окружности (рис. 4). Такая закономерность роста сохраняется при нанесении покрытий других дихалькогенидов молибдена и вольфрама (например, $MoSe_2$, WS_2, WSe_2) (см. рис. 2 и 3).

Экспериментально обнаружено, что фазовый переход от аморфной структуры к кристаллической нелинейный [4—12], т.е. происходит в диапазоне температур (см. рис. 3). Однако область кристаллизации для $MoSe_2$, WS_2, WSe_2 в сравнении с дисульфидом молибдена MoS_2 смещена в зону более высоких температур. Наиболее высокие температуры перехода от аморфной структуры к текстурированной кристаллической у диселенида вольфрама WSe (смещение области более высоких триботехнических характеристик в зону более высоких температур). Это может быть связано со смещением потенциального барьера поверхностной энергии U_b в область более высоких температур для более тугоплавких соединений. Также такое смещение приводит к увеличению ширины области кристаллизации, наименьшая ширина области кристаллизации у MoS_2 (473...523 K), наибольшая — у WSe_2 (493...563 K) [6—14].

Итак, при расположении образца в центре платы держателя кристаллиты росли в виде текстуры с осями $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$ при соответствующих температурах подложки (см. рис. 1—4). Ось [0001] полностью разориентирована в плоскости, параллельной поверхности подложки. По мере удаления от центра платы на периферию при сохранении текстуры $[10\bar{1}0]$ возникала вторая ось текстуры [0001] с ориентацией по радиусам из центра платы. Для MoS_2 при температуре подложки 673...773 K возникает текстура $[11\bar{2}0]$ вместо $[10\bar{1}0]$ при сохранении одновременной ориентации второй оси текстуры [0001] по радиусам из центра платы. При удалении от центра платы кристаллиты образуют замкнутые концентрические окружности вокруг центра платы в виде вихревых структур.

Текстуры с осями $[10\bar{1}0]$ и $[11\bar{2}0]$ в покрытиях на основе дихалькогенидов — текстуры роста, так как они возникают не на стадии зарождения, а на более поздних стадиях. Например, в случае нанесения дисульфида молибдена на полированные образцы из стали или Al_2O_3 при температуре 523 K покрытие неоднородно по толщине.



а *б*

Рис. 2. Поверхность покрытий $MoSe_2$, наносимых при температуре 553K толщиной 0,5 мкм при расположении образцов в центре платы (*а*) и на периферии (*б*)

а *б* *в*

Рис. 3. Электронограммы покрытий $MoSe_2$ (*а, б*) и MoS_2 (*в*) толщиной 0,5 мкм, нанесенных при 553 K ($MoSe_2$), 723 K (MoS_2) и расположении образцов в центре платы (*а*, *в*) и на ее периферии (*б*)

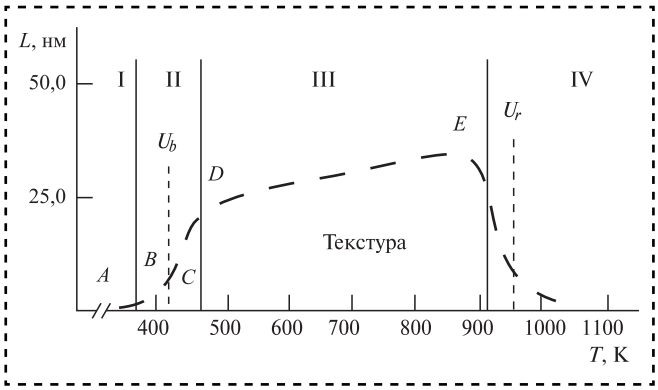


Рис. 4. Зависимость размера кристаллов *L* покрытий MoS_2 от температуры подложки *T* на образцах из Al_2O_3: I — аморфная структура; II — поликристалл; III — текстура; IV — область разложения дихалькогенида MX_2 на металл и халькоген; U_b — потенциальный барьер поверхности MoS_2; U_r — энергия разложения MoS_2

Покрытия толщиной менее 0,08 мкм обладают аморфной структурой и имеют ровную поверхность. При фрикционных испытаниях такие покрытия не проявляли антифрикционного действия, как и в случае нанесения покрытий при низких температурах подложки. Покрытия толщиной более 0,1 мкм при указанных условиях имели хорошие антифрикционные свойства.

Поверхность растущего покрытия имеет характерный вид дендритной структуры с гребнеобразной формой (см. рис. 2). В результате конкурентного отбора в процессе нанесения покрытия преимущественный рост получают кристаллографические плоскости с индексами $(10\bar{1}0)$, имеющие наиболее высокую поверхностную энергию. При этом атомно-гладкие плоскости (0001) растущих кристаллов, где действуют слабые силы Ван-дер-Ваальса, обеспечивают непрерывный приток мигрирующих атомов в область кристаллизации, что обеспечивает рост кристаллитов в виде пластинок.

Увеличение температуры подложки выше температуры нелинейного фазового перехода от аморфной структуры к кристаллической приводит к дальнейшему практически линейному росту размера кристаллов в покрытиях при сохранении дендритного строения поверхности для покрытий всех дихалькогенидов (см. рис. 3). При фрикционных испытаниях дихалькогенидные покрытия с аморфной структурой не проявляли антифрикционного действия, в то время как покрытия с кристаллической структурой имели достаточно высокие триботехнические характеристики. Подобные свойства наблюдали для покрытий из всех исследованных дихалькогенидов. Антифрикционные свойства кристаллических покрытий с ростом размера кристаллитов повышались пропорционально размеру кристаллов (см. рис. 3). В этих экспериментах менялась только температура подложки.

Дальнейшее улучшение триботехнических свойств покрытий возможно при изменении технологии нанесения и создании легированных многослойных покрытий с износостойким подслоем. Например, увеличение твердости подложки приводит к снижению коэффициента трения и повышению долговечности покрытий на основе дихалькогенидов, что объясняется легкостью раскалывания кристаллитов и формированием преимущественной ориентации оси [0001], перпендикулярно к поверхности в процессе трения, обеспечивающей легкость скольжения пакетов X—M—X (X — халькоген, M — металл) дихалькогенида друг относительно друга. Также триботехнические и физико-механические характеристики улучшаются при легировании дисульфида молибдена [4—22].

Механизм роста износостойких покрытий, используемых в качестве твердого износостойкого подслоя (оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия), аналогичен механизму роста кристаллитов при нанесении покрытий из нитрида алюминия AlN (имеющего гексагональную кристаллическую структуру с решеткой вюртцита) методом магнетронного распыления (см. рис. 4). По мере удаления от центра формируются покрытия с осью $[10\bar{1}0]$ при наличии одновременной ориентации второй оси текстуры [0001] по радиусам из центра платы. Вторая ось [0001] кристаллитов плавно наклоняется в сторону центра платы вплоть до наклона 15° к поверхности подложки при соответствующем наклоне основной оси текстуры $[10\bar{1}0]$ соответственно в сторону центра.

При нанесении вакуумными ионно-плазменными методами и методом электронно-лучевого испарения (РЭП) покрытий из чистого молибдена и хрома, а также их соединений типа нитридов и оксидов с кубической объемно-центрированной кристаллической решеткой, в центре платы на образцах формировалось покрытие с осью текстуры [110]. По мере

удаления на периферию происходил постепенный наклон оси текстуры [110] в сторону центра (вплоть до перехода в текстуру с осью [111]) при одновременной ориентации оси [100] по радиусам из центра платы. В этом случае также сохранялся подобный механизм роста кристаллов.

Рост кристаллов покрытия Cr_2O_3 с тригональной структурой (пространственная группа $D_{3s}^6 - R\bar{3}c$) подчинялся той же закономерности — в центре платы формируется текстура с осью $[10\bar{1}0]$, перпендикулярной к поверхности подложки. При удалении к периферии наблюдается плавный наклон оси $[10\bar{1}0]$ к центру с одновременной ориентацией оси [0001] по радиус-вектору, выходящему из центра держателя образцов. Хотя здесь явно не просматривается двумерной вытянутости кристаллов, как в случае дихалькогенидов переходных металлов, что связано с отсутствием столь значительной анизотропии поверхностной энергии соответствующих кристаллографических граней.

Полученные результаты свидетельствуют о возникновении подобия на разных шкалах измерения покрытий на основе дихалькогенидов молибдена и вольфрама (MoS_2, $MoSe_2$, WS_2 и WSe_2), а также подобие покрытий на основе оксидов хрома, нитридов молибдена и алюминия, наносимых ионным распылением в вакууме. Подобие структуры покрытий заключается в формировании текстур с двумя осями (рис. 5) [4—12].

Легированные покрытия из дисульфида молибдена состава MoS_2D_x по внешнему виду практически не отличаются от обычных покрытий MoS_2. В качестве легирующего вещества D могут быть выбраны элементы или соединения, не образующие сильных (химических) связей с основной решеткой MoS_2. При фрикционных испытаниях по схеме "диск—сфера" покрытий с кристаллической структурой гексагонального дисульфида молибдена 2H—MoS_2 получены достаточно низкие значения коэффициента трения, но в целом соответствующие трению природного дисульфида молибдена. Однако фрикционные испытания в тех же условиях покрытий состава MoS_2D_x привели к получению необычно низких значений коэффициента трения (эффекта сверхнизкого трения) (рис. 6).

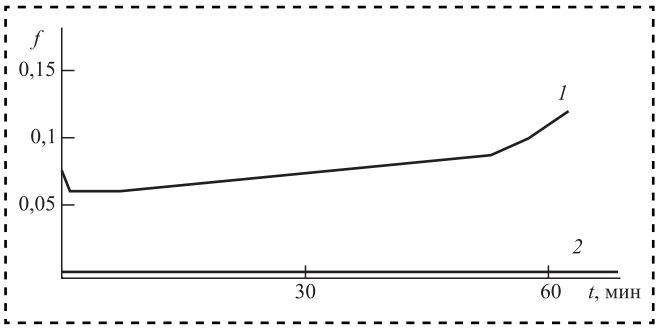


Рис. 6. Зависимость коэффициента трения от длительности испытаний легированных покрытий на основе дисульфида молибдена:
1 — MoS_2; *2* — MoS_2D_x

Электронографические исследования покрытий MoS_2D_x показали, что в них произошло значительное увеличение периода решетки вдоль оси *c* (до 1,38...1,43 нм) по сравнению с 1,2295 нм для соединений со стехиометрическим составом (гексагональный 2H—MoS_2) при практически неизменном периоде вдоль оси *a*. Увеличение расстояния между слоями при размещении атомов D в межпакетных пространствах в силу того, что энергия ван-дер-ваальсова взаимодействия меняется пропорционально r^{-6}, должно приводить к уменьшению этого взаимодействия практически на порядок. В соответствующих условиях возможна реализация движения таких атомов без диссипации энергии в виде эффекта сверхнизкого трения. Нанесение легированных многослойных покрытий приводит к возможности получения сверхнизкого трения при нормальных условиях на воздухе и сопровождается возрастанием долговечности покрытия в несколько раз.

Установлено, что наиболее высокими антифрикционными свойствами обладают покрытия из дихалькогенидов с кристаллической структурой, по-

Рис. 5. Электронограммы покрытий AlN (*а*, *б*) толщиной 2,5 мкм при расположении образцов в центре платы (*а*) и на ее периферии (*б*)

крытия с аморфной структурой практически неработоспособны. Легирование кристаллических покрытий приводит к получению эффекта сверхнизкого трения.

Рассмотрим преобразования Лоренца, используемые для определения связи пространства и времени, а также взаимосвязь парных и путаных частиц, причины формирования таких пар.

Изменение геометрии частиц при движении

При переходе от какого-либо события в одной инерциальной системе отсчета, характеризуемого четырьмя пространственно-временными координатами, к другой инерциальной системе отсчета необходимы преобразования координат и времени при таком переходе (а именно, преобразования Лоренца). Рассмотрим изменения геометрии тел при таком переходе.

Преобразованиями Лоренца в физике, например, в специальной теории относительности (СТО), называют преобразования, которым подвергаются пространственно-временные координаты (x, y, z, t) каждого события при переходе от одной инерциальной системы отсчета (ИСО) к другой. Аналогично, преобразованиям Лоренца при таком переходе подвергаются координаты любого 4-го вектора. Рассмотрим преобразования Лоренца для пространственных координат и времени электрического и магнитного полей в разных системах отсчета (движение инерциальной системы отсчета только условно прямолинейное и равномерное (рис. 7, 8)) [13—15, 22—29]:

$$x = \frac{x' + \mathrm{v}t'}{\sqrt{1-\beta^2}};\ y = y';\ z = z';\ t = \frac{t' + \left(\mathrm{v}/c^2\right)}{\sqrt{1-\beta^2}}x', \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме, $\beta = \mathrm{v}/c$.

Формулы, выражающие x', y', z', t' через x, y, z, t, получаются из соотношения (1) заменой v на −v. При движении материального тела со скоростью v и использовании преобразований Лоренца происходит сжатие длины

$$l' = l_0\left(1 - \mathrm{v}^2/c^2\right)^{1/2} \quad (2)$$

и замедление времени

$$t' = t_0\Big/\left(1 - \mathrm{v}^2/c^2\right)^{1/2}, \quad (3)$$

где c_0 — скорость света в вакууме. Штрихом отмечены координаты и время движущейся со скоростью v системы.

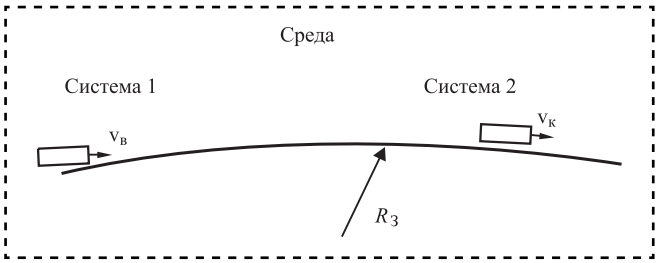


Рис. 7. Движение инерциальных систем отсчета по земной поверхности (кривизна $R_З$) с постоянной скоростью:
1 — вагон, движущийся со скоростью $v_в$; *2* — корабль, движущийся со скоростью $v_к$

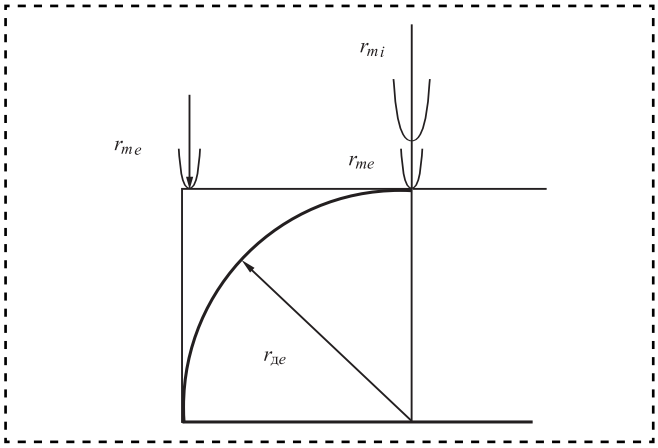


Рис. 8. Различная кривизна поля в разных областях электрона:
r_{me} — классический радиус электрона (радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния) — радиус кривизны массы; $r_{де} = \alpha r_{me}$ — комптоновский радиус электрона (где α — постоянная тонкой структуры)

При переходе из одной системы отсчета в другую (движущуюся относительно первой) со скоростью v проекции векторов электромагнитного поля **E**, **H** также связаны между собой преобразованиями Лоренца

$$\vec{E} = \frac{1}{c}\frac{[\mathrm{v} \times \mathrm{H}]}{\sqrt{1-\beta^2}}. \quad (4)$$

Однако представления Лоренца об электронном строении вещества основаны на предположении о существовании эфира, в результате чего были получены эти преобразования, а также представления электродинамики Лоренца о строении и движении электронов. Согласно этим представлениям при движении материального тела происходит его сжатие вдоль направления перемещения пропорционально скорости перемещения. В соответствии со взглядами Лоренца, явление сжатия тел вдоль направления движения

связано с упругим взаимодействием движущейся частицы с особой средой, названной эфиром. В ходе дальнейших исследований не было подтверждено влияние эфира на изменение геометрии тел. Закон сохранения энергии утверждает, что энергия тела никогда не исчезает и не появляется вновь, она может лишь превращаться из одного вида в другой. Получение энергии из вакуума не представляется возможным, энергию вакуума не удается вычислить как собственное значение для гамильтониана вакуумного состояния [13—15, 22—25], т.е. как источника энергии. Следовательно, возникает несоответствие закону сохранения энергии.

Поэтому изменение размеров тела в процессе движения принято в виде постулата. Кроме того, наличие статического электрического поля при кулоновском взаимодействии не объясняет причину возникновения движения пробной заряженной частицы по закону Кулона. В реальных физических системах энергетически выгодным является движение непрямолинейное и равномерное, это движение без рассеяния энергии по имеющим кривизну эквипотенциальным поверхностям. Движение с ускорением происходит вдоль радиуса потенциального векторного поля до фазового перехода частицы в новое состояние с последующим излучением соответствующего кванта энергии с формированием равновесия. Эти представления можно применить к электрону с учетом квантово-механических свойств электрона.

Электрон и среда, в которой он находится, включают несколько экспериментально измеренных параметров: r_{me} — классический радиус электрона (радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния); $r_{де}$ — комптоновский радиус электрона; c_0 — скорость света; α — постоянная тонкой структуры; $\lambda_{де}$ — комптоновская длина волны вероятности; h — постоянная Планка; ν — частота колебаний электрона [26—27]. Спин электрона $S = 1/2\ h$ является критерием подобия как отношение де Бройля $r_{де}$ и Томсона r_{me}. Скорость света c_0 также является критерием подобия отношения де Бройля ко времени колебания электрона $t_{де}$ и зависит от плотности среды ρ_c. Рассмотрим электрон как волчок со спином S и смещенным центром тяжести [10—12]. При пропорциональном изменении вдоль оси x кривизны массы $1/r_{де}$ точка максимальной массы находится в точке A (или на радиусе 1), хотя должна находится в точке B (рис. 9). Наблюдается реальное смещение центра масс электрона на расстояние $r_{де}$ и превращение его в конструкцию волчка с соответствующими особенностями [4—12]. Такой электрон обладает как волновыми, так и корпускулярными (квантовыми) свойствами.

Масса покоя электрона m_e — это масса в системе отсчета, относительно которой данная частица неподвижна, она может быть переменной в зависимости от его скорости. Спин $\hbar J$ измеряют в единицах $\hbar$ (приведенной постоянной Планка, или постоянной Дирака), где J — характерное для каждого сорта частиц целое (в том числе нулевое) или полуцелое положительное число — так называемое *спиновое квантовое число.* В связи с этим можно говорить о целом или полуцелом спине частицы как квантовой характеристике:

$$h = m_e c_0 \lambda_{де}, \tag{5}$$

где c_0 — измеренная скорость света [34, 35].

Радиус кривизны r_{me}, определяющий массу, для электрона можно определить по формуле:

$$r_{me} = \mu_0 q^2/4\pi m_e, \tag{6}$$

тогда

$$m_e = \mu_0 q^2/4\pi\ r_{me}. \tag{7}$$

Из формул (1), (2) следует постоянство скорости света c_c в инерциальных системах отсчета, движущихся с различными скоростями v_v. В то же время в сильных гравитационных полях c_c замедляет пропорционально плотности среды ρ_c и β.

Введем безразмерный коэффициент массы

$$k_m = \mu_0 q^2/4\pi,$$

где μ_0 — магнитная постоянная; q — элементарный заряд.

Среда является суммой суперпозиций полей элементарных частиц и определяет в свою очередь их свойства и геометрию. Соотношение $\lambda'_{де}/r'_{me} = 2\pi\alpha$ остается постоянным, при этом r'_{me} изменяется согласно преобразованиям Лоренца, а $\lambda_{де}$ (длина направлена под 90° к направлению движения) остается постоянной и зависит от плотности среды ρ_c.

Постоянная тонкой структуры — критерий подобия системы частиц — равна отношению r_{me}

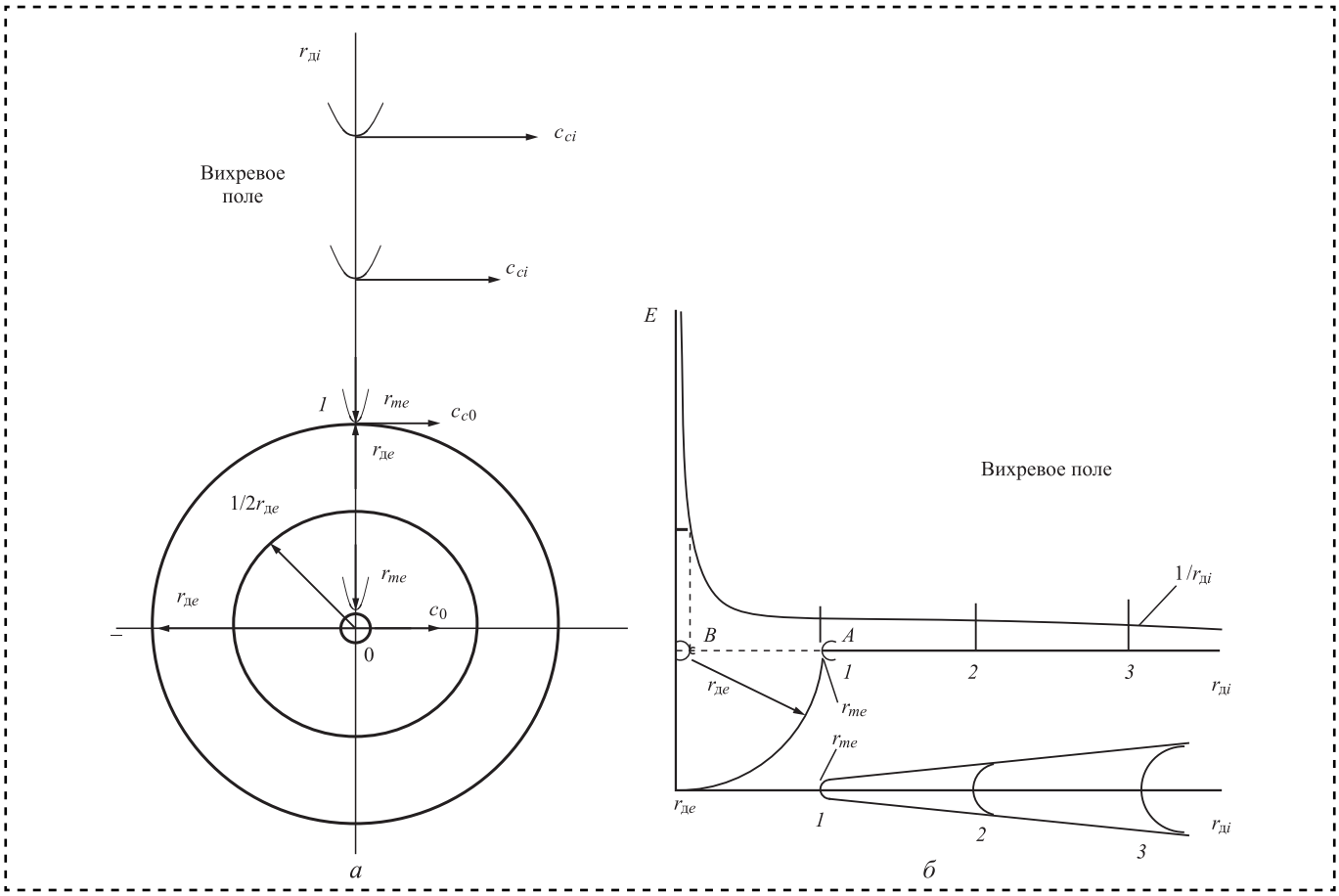


Рис. 9. Строение электрона (*а*) и вихревого поля электрона (*б*):

$E = k\dfrac{1}{r_{дi}}$

(классический радиус электрона (радиус Лоренца или длина томсоновского рассеяния)) к $r_{де}$ (комптоновский радиус электрона):

$$\alpha = r_{me}/r_{де} = q^2/2\varepsilon_0 hc_0 = q^2\mu_0 c/2h, \qquad (8)$$

где ε_0 и μ_0 — электрическая и магнитная постоянные.

Рассмотрим свойства среды как суперпозицию полей частиц. Плотность среды ρ_c определяется массой m_c, находящейся в единице объема V_n

$$\rho_c = m_c/V_n \qquad (9)$$

и определяет обратную величину скорости вихревого поля C_c как скорость движения суммы полей частиц C_{ci} в точке пространства

$$1/C_c = \Sigma 1/C_{ci}. \qquad (10)$$

Математически скорость света c_c является пределом суммы ряда обратных величин скоростей вихревых полей всех частиц в данной точке пространства, которая и определяет скорость света в векторной точке как скорость движения суммы полей

$$l/c_{c0} = \sum_{i=1}^{n} 1/c_{ci}\,.$$

При нарушении симметрии среды возникает движение частицы под влиянием поперечного потока среды (рис. 10) [10—12, 21—24]. Поперечный поток вызывает продольное спиральное вихревое движение электрона (рис. 11). Изменение геометрии поперек направления движения (вдоль осей *YZ* и возникновение спирали) позволяет получить новые варианты движения частиц, отличные от прямолинейного и равномерного движения. Применим наши преобразования для получения вихревого движения. Также учтем влияние среды как полной энергии находящейся в ней частицы [29]:

$$W_s = U_p + E_k, \qquad (11)$$

где U_p — потенциальная энергия;

E_k — кинетическая энергия.

Рассмотрим изменение квадрата импульса при движении частицы. Сжатие частицы при росте скорости v происходит по оси X вдоль направления движения согласно преобразованию Лоренца:

$$m_{e1}^2 C_c^2 = m_{e0}^2 C_c^2 + m_{ev1}^2 v^2.$$

Взаимодействие двух частиц с последующим движением под действием электрического поля осуществляется по правилу треугольника в векторной форме

$$\mathbf{C}_c = \mathbf{C}_v + \mathbf{v}_v, \qquad (12)$$

где $\mathbf{C}_c = 4\pi c_0$ — синусоидальная скорость света;

c_0 — измеренная скорость света [34, 35];

$\mathbf{C}_v$ — скорость движения по радиусу $\mathbf{r}_{де v}$;

$\mathbf{v}_v$ — скорость движения частицы.

Тогда в скалярном виде разложение скорости C_c равно

$$C_c{}^2 = C_v{}^2 + v_v{}^2.$$

Однако, если принять переменой скорость света в среде (которая не превышает синусоидальной скорости света $\mathbf{C}_c$ как некоторого предела), тогда энергия движущейся частицы выражается следующим образом. Сжатие частицы при росте скорости движения v проходит по спирали в виде вихря вдоль осей Y и Z подобно преобразованию Лоренца (рис. 11, 12):

$$m_{ev}^2 C_v^2 = m_{e0}^2 C_c^2 + m_{ev}^2 v_c^2, \qquad (13)$$

где m_{e0} — масса покоящегося электрона;

m_{ev} — масса движущегося электрона.

Замедление времени также сохраняется как преобразования Лоренца

$$t' = t_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}.$$

Однако необходимо различать время вихревого (кругового) $t_в$ и прямолинейного $t_п$ движений, в сумме дающих время t_0, постоянное для данной плотности среды ρ_c:

$$t_0{}^2 = t_в{}^2 + t_п{}^2.$$

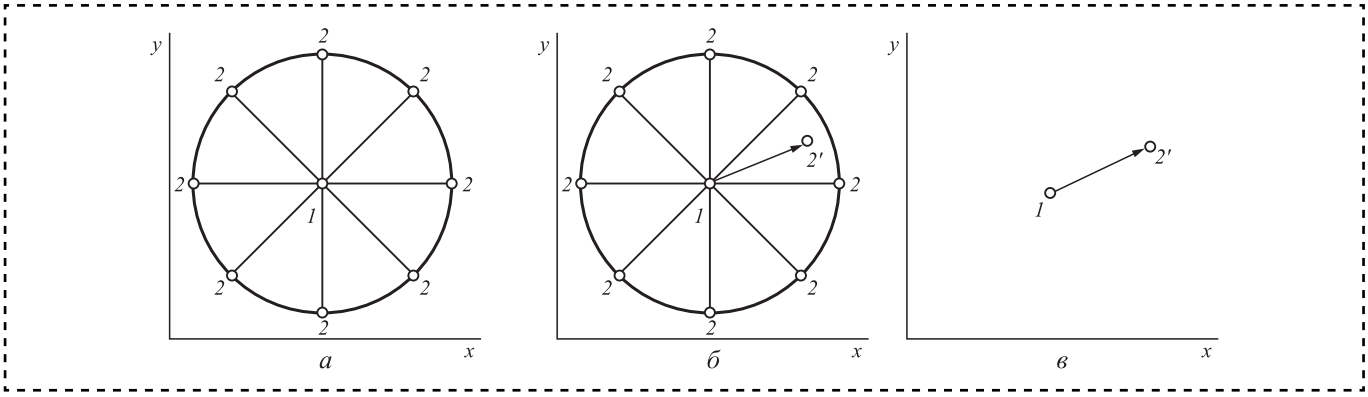


Рис. 10. Волна вероятности де Бройля

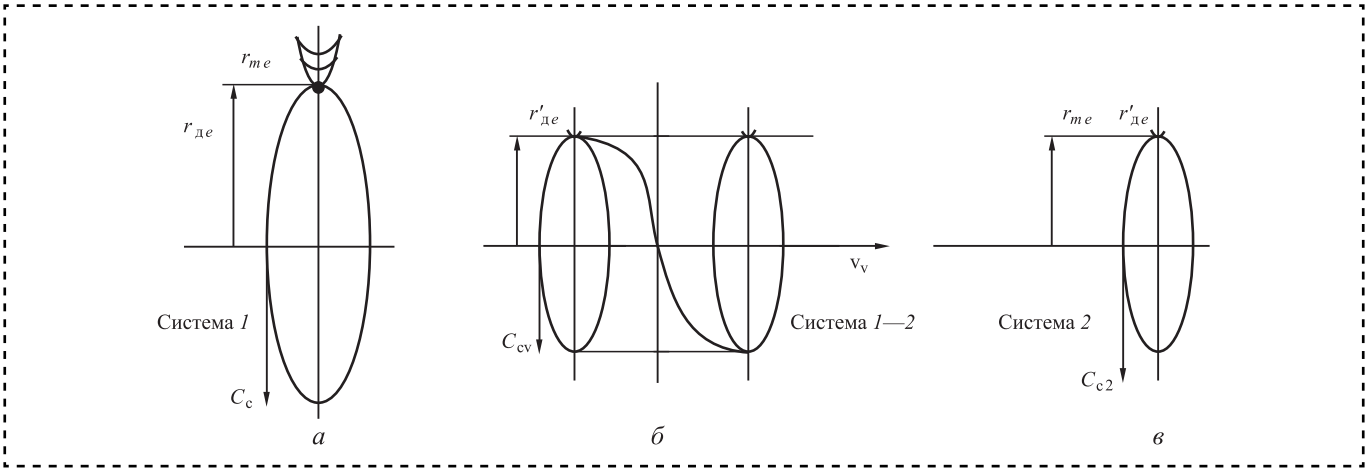


Рис. 11. Взаимодействие пробной частицы *1* с частицами *2* в их симметричном поле (*а*), с нарушенным равновесием (*б*), двух частиц (*в*) в среде

Движение в силовых потенциальных полях (электрическом или гравитационном) прямолинейное и ускоренное. При увеличении скорости движения до критической величины, определяемой фазовым переходом при критическом характерном параметре (преодоление потенциального барьера). После излучения фотонов (энергии, равной потенциальному барьеру) фотон и электроны в атоме движутся по атомным орбиталям с постоянной скоростью. Тем самым частицы при движении с ростом скорости v_c превращаются в спираль соленоидальной структуры. Энергия потока поля, проходящего через частицу (тело), численно равна кинетической энергии движения движущейся частицы (тела), что вызывает сохранение количества энергии поля и частицы. Равновесие между плотностью поля (средой) и частицей определяется законом сохранения энергии. Волна движущегося электрона представляет собой волны классической и квантовой вероятности обнаружения частицы в среде (рис. 12).

Инерциальные системы отсчета (ИСО). В основе теории относительности лежит фундаментальный физический принцип относительности, согласно которому все физические процессы в инерциальных системах отсчета протекают одинаково, независимо от того, неподвижна ли система или она находится в состоянии равномерного и прямолинейного

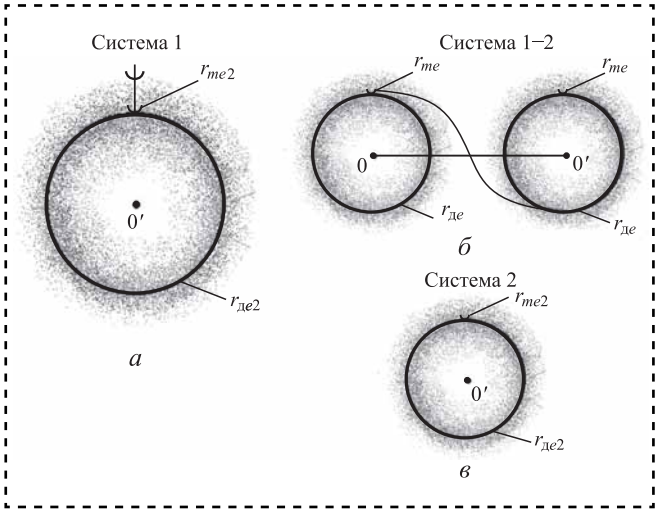


Рис. 12. Волна вероятности Шредингера:
а — электрон, покоящийся в системе *1* при v = 0, плотность ρ_1; *б* — движущийся электрон (переход от системы *1* к системе *2* при скорости v_1, плотность среды ρ_{1-2}); *в* — электрон, покоящийся в системе *2* при v = 0, плотность среды ρ_2

движения. Инерциальной называется система отсчета, по отношению к которой пространство является однородным и изотропным. Теория относительности позволяет определить преобразования в инерциальных системах отсчета, движущихся с различными скоростями. Принцип относительности является фундаментальным физическим принципом, одним из принципов симметрии. Движение тел и частиц в этих случаях отсчета не является прямолинейным в строгом смысле (см. рис. 8), их движение происходит по земной поверхности, которая является римановой с положительной кривизной. Равномерное движение представляет собой перемещение по эквипотенциальным поверхностям с постоянной скоростью (например, электроны на атомной орбитале в атоме или на эквипотенциальной поверхности Ферми) без диссипации энергии.

В теории гравитации ОТО введены изменения понятий *инерциальных систем отсчета* и теории равномерного движения, что позволило создать частицы с геометрией возможности создания из электрона более сложных частиц типа протона и нейтрона [4—12].

Движение по геодезическим линиям (см. рис. 7—9). Согласно общей теории относительности (ОТО) движение материальной точки в поле тяготения рассматривается как свободное "инерциальное" движение. В этом случае *движение совершается по геодезическим линиям* и подобно наблюдаемому в природе. В ОТО был сделан шаг к криволинейному инерциальному движению по *геодезической линии движения частиц* — кривой определенного типа, обобщающей понятия "прямая" для искривленных пространств. Конкретное определение геодезической линии зависит от типа пространства. Например, на двумерной поверхности, вложенной в евклидово трехмерное пространство, геодезические линии — это линии, достаточно малые дуги которых являются на этой поверхности кратчайшими путями между их концами. На плоскости это будут прямые, на круговом цилиндре — винтовые линии, прямолинейные образующие и окружности, на сфере — дуги больших окружностей.

Геодезические линии активно используются в релятивистской физике. Так, например, пробное тело в общей теории относительности движется по геодезической линии пространства-времени. Временная эволюция всех ла-

гранжевых систем может рассматриваться как движение по геодезической в специальном пространстве. Таким образом, представима вся теория калибровочных полей. Движение без рассеяния энергии осуществимо по эквипотенциальным поверхностям среды. Однако в основе теории относительности лежит 4-й вектор пространства-времени, при этом последнее состоит из точек, что приводит к несовместимости с квантовой механикой, в основе которой лежат частицы, состоящие из частиц-корпускул, которые также имеют волновые свойства. Тем самым частицы имеют корпускулярно-волновое строение. Тем не менее в теории относительности был получен ряд важных выводов:

— свойства пространства-времени зависят от движущейся материи;

— луч света, обладающий инертной, а следовательно, и гравитационной массой, должен искривляться в поле тяготения;

— частота света под действием поля тяготения должна смещаться в сторону более низких значений.

Следовательно, в реальном окружающем мире вообще отсутствует строго прямолинейное движение. Приведем в соответствии с изложенными представлениями о движении электрона с собственным потенциальным полем в среде. Реальные физические процессы — электрический ток, процесс трения, движение жидкостей, рост кристаллов — неравновесные диссипативные процессы, потоки энергии и вещества вдали от равновесия [16, 17]. Неравновесная термодинамика — раздел термодинамики, изучающий системы вне состояния термодинамического равновесия и необратимые процессы. Подавляющее большинство встречающихся в природе систем и процессов находятся вдали от термодинамического равновесия. Однако в таких неравновесных процессах возможно возникновение стационарных потоков вещества, движущихся без диссипации. Классическая неравновесная термодинамика основана на предположении о локальном равновесии в целом неравновесной диссипативной системы. На основании этого разработана флуктуационно-диссипативная теорема, связывающая спектральную плотность флуктуаций системы с ее диссипативными свойствами. Рассмотрим систему элементарных частиц типа электронов как диссипативную.

Диссипативная система (или диссипативная структура) — это открытая система, которая оперирует вдали от термодинамического равновесия, устойчивое состояние, возникающее в неравновесной среде при условии рассеяния энергии, которая поступает извне. Диссипативную систему иногда называют *стационарной открытой системой*, или *неравновесной открытой системой*, она характеризуется спонтанным появлением сложной, зачастую хаотичной структуры. Простым примером такой системы являются ячейки Бенара. Более сложные примеры: лазеры, реакция Белоусова—Жаботинского и даже сама биологическая жизнь. В таких системах возникают вихревые структуры. Вихревые структуры в устойчивом состоянии широко распространены в природе — рост кристаллов, раковины, атмосферные вихри, вихри воды. Современная теория относительности, квантовая механика, термодинамика не объясняют возникновение вихревых структур. Вселенная после Большого взрыва (общепринятой космологической модели развития Вселенной) имеет достаточно однородную сотовую структуру. Солнечная система и Земля являются подобием планетарных систем мира, поэтому далее более подробно исследуем эту аналогию на примере получения потоков вещества, движущихся без диссипации энергии.

Движение без диссипации энергии осуществляется по эквипотенциальным поверхностям вдоль вихревого векторного поля поперек силовых линий потенциального векторного поля. В электроне при определенной плотности среды существует несколько кривых поля (положительной и отрицательной кривизны), взаимосвязанных с постоянными строения частицы (см. рис. 7). Существует ряд возрастающих по величине взаимодействий: от близкодействующих (сильного ядерного и электромагнитного) до межмолекулярного (ван-дер-ваальсового). Близкодействие определяется расстояниями взаимодействия, соизмеримыми с размерами частиц. Дальнодействующее гравитационное взаимодействие действует на существенно больших расстояниях. Энергия электромагнитного взаимодействия больше в сравнении с гравитационным взаимодействием в $4{,}17 \cdot 10^{42}$ раз [29—31].

Образование Вселенной как диссипативной системы парных и путаных частиц

Согласно современным представлениям, окружающий нас мир образовался в результате фазового перехода типа Большого взрыва из сингулярного состояния в современное состояние материи [13—19]. Состояние Вселенной в определенный момент времени в прошлом, когда плотность энергии (материи) и кривизна пространства-времени составляют порядка планковских значений, называется космологической сингулярностью. Это состояние, вместе с последующим этапом эволюции Вселенной, пока плотность энергии (материи) оставалась высокой, называют также Большим взрывом. Космологическая сингулярность — один из примеров гравитационных сингулярностей, предсказываемых общей теорией относительности (ОТО) и некоторыми другими теориями гравитации. Движение частиц вселенной после фазового перехода приняло вихревой вид (галактические системы, планетарные системы, вихревые потоки частиц газа и т.д.) [18]. Космологическое сингулярное состояние Вселенной в определенный момент времени в прошлом — это когда плотность энергии (материи) и кривизна пространства-времени соответствовали планковским значениям. Такое состояние подобно веществу черной дыры. Черная дыра есть особое состояние материи, граница этой области называется горизонтом событий, а ее характерный размер — гравитационным радиусом. В результате Большого взрыва возникла сотовая ячеистая структура с достаточно равномерным распределением вещества с плотностью 1 частица/м^3, число полученных частиц $3{,}28\cdot10^{80}$. Образование вихревых структур является следствием фазового перехода с преодолением критической величины потенциального барьера. При фазовом переходе произошло возникновение явления квантовой запутанности частиц подобных спаренным электронам в атомах и молекулах [26—37].

Для классического предсказания будущего пробной частицы через некоторое время необходимо учесть влияние и взаимодействие всех частиц (10^{85}) и их вероятностное распределение по Вселенной — чем дальше от пробной частицы, тем слабее влияние окружающих частиц и их взаимодействие, поэтому при квантовом подходе справедлива формула:

$$1/r_{me} = \sum_{i=1}^{n} 1/r_{mi}. \qquad (14)$$

Постоянство колебаний всех частиц $\gamma_{де} = 1/t_{де}$ и постоянство угловой скорости $\omega_{де} = 2\pi/t_{де}$ всех частиц Вселенной позволяет рассматривать ее как единую диссипативную систему. Движение по геодезическим линиям как криволинейное движение без диссипации энергии типа возникает как следствие фазового перехода и представляет собой движение без диссипации энергии. Сформированная посредством полей частиц среда связывает все частицы Вселенной в диссипативную систему и, в свою очередь, определяет строение находящихся в ней частиц. В среднем система находится в колебательном равновесии и флуктуирует с частотой среды. Скорость передачи сигнала в диссипативной системе соответствует частоте выравнивания флуктуаций соответственно флуктуационно-диссипативной теореме $\omega_{де} = 2\pi/t_{де} = 4{,}87825\cdot10^{21}$ с$^{-1}$ при времени взаимодействия $t_{де} = r_{де}/c_0 = 0{,}4043913\cdot10^{-20}$ с. Взаимодействия в твердых телах (металлические, ковалентные, ионные) достаточно сильнодействующие, связанные с обменом или обобществлением электронов, в то время как ван-дер-ваальсово взаимодействие проявляет себя межмолекулярными взаимодействиями между электрически нейтральными атомами или молекулами без обмена электронами [30, 31].

Вихревое движение заложено в спине электрона и возникло в момент Большого взрыва при формировании элементарных частиц. Спаренные и путаные частицы означают передачу взаимодействия больше скорости света [32—37]. По утверждению Эйнштейна, если квантовая механика полна, то она должна быть нелокальной. *Полнота* означает несводимость квантовой случайности к классической, *нелокальность* — допущение распространения сигналов с бесконечной скоростью, мгновенное действие на расстоянии. Путаные квантовые частицы образуют наряду со взаимодействием со средой дальнодействующее взаимодействие. Понятие "квантовая запутанность" появилось из теоретического предположения, вытекающего из уравнений квантовой механики: если две квантовые частицы (электроны или фотоны) оказываются взаимозависимыми (путаными), то связь сохраняется, даже если их разнести в разные части Вселенной.

По предположениям Белла, любая теория, использующая скрытые параметры, должна

быть нелокальной. В физике *принцип локальности/близкодействия* утверждает, что на объект влияет только его непосредственное окружение. Квантовая механика предсказывает посредством неравенств Белла прямое нарушение этого принципа [32—37]. Эксперименты Белла показали, что квантово запутанные частицы нарушают этот принцип. Они влияют друг на друга, будучи физически удаленными друг от друга на значительные расстояния, тем самым подтверждая, что принцип локальности/близкодействия неверен.

Квантовая нелокальность, или квантовая запутанность, — это квантово-механическое явление, при котором квантовые состояния двух или большего числа объектов оказываются взаимозависимыми. Например, можно получить пару частиц (фотонов), находящихся в запутанном состоянии, и тогда если при измерении спина первой частицы спиральность оказывается положительной, то спиральность второй всегда оказывается отрицательной, и наоборот. Такая взаимозависимость сохраняется, даже если эти объекты разнесены в пространстве за пределы любых известных взаимодействий. Измерение параметра одной частицы приводит к мгновенному (выше скорости света) прекращению запутанного состояния другой, что находится в логическом противоречии с принципом локальности (при этом теория относительности не нарушается и информация не передается). Поэтому существование и воздействие среды как суперпозиции полей всех частиц можно рассматривать как скрытые параметры, влияющие на геометрию и движение всех частиц диссипативной системы.

Взаимодействие близкодействующее и дальнодействующее. Принцип суперпозиции и аддитивность

Дальнодействие и близкодействие (или короткодействие) — две концепции классической физики, противоборствовавшие на заре ее становления. **Дальнодействие** — концепция, согласно которой тела действуют друг на друга без материальных посредников, через пустоту, на любом расстоянии. Такое взаимодействие осуществляется с бесконечно большой скоростью (но подчиняется определенным законам). Примером силы, считавшейся одним из примеров непосредственного действия на расстоянии, можно считать силу всемирного тяготения в классической теории гравитации Ньютона, силу кулоновского взаимодействия двух электрических зарядов до создания теории Максвелла и магнитные силы в конкурировавших с максвелловской теорией теориях электромагнетизма Вебера и других. **Близкодействие** (или короткодействие) — концепция, согласно которой взаимодействия передаются с помощью особых материальных посредников и с конечной скоростью. Например, в случае электромагнитных взаимодействий таким посредником является электромагнитное поле, распространяющееся со скоростью света.

Спином квантовой частицы (электрона, фотона) называют ее собственный угловой момент. Спин можно представить в виде вектора, а саму квантовую частицу — в виде микроскопического магнита. В квантовой механике принято, что когда за частицей или квантом, например электроном, никто не наблюдает, то он имеет все значения спина одновременно. Это фундаментальное понятие квантовой механики называют суперпозицией. Спутанные частицы синхронны и коррелированны. Корреляция (от лат. "correlatio" — соотношение, взаимосвязь) означает меру статистической вероятностной зависимости между случайными величинами (переменными). Рассмотрим взаимодействие Кулона как полную энергию аддитивной суммы двух и более заряженных частиц и суперпозицию всех полей среды [21].

Кулоновское взаимодействие двух зарядов в вакууме направлено вдоль прямой, соединяющей эти заряды, пропорционально их величинам и обратно пропорционально расстоянию между ними. Оно является силой притяжения, если знаки зарядов разные, и силой отталкивания, если эти знаки одинаковы. Взаимодействие возникает при движении пробной частицы поперек эквипотенциальных поверхностей вихревого поля. Эквипотенциальные поверхности — понятие, применимое к любому потенциальному векторному полю, например, к электрическим или гравитационным полям [29—37]. Различают два основных типа векторных полей: потенциальные (безвихревые) и вихревые (соленоидальные) поля. Поведение пробной частицы — электрона в поле протона описывают взаимодействием Кулона. Процесс образования атома из электрона и протона представляет собой нелинейный диссипативный процесс фазового перехода при критической величине характерного параметра (преодоление потенциального барьера).

Наложение двух вихревых потоков и создание квантовой суперпозиции общего поля

есть взаимодействие частиц. Сначала рассмотрим систему частиц в среде, состоящей из частицы с отрицательным зарядом *1* и симметрично окруженный положительными зарядами *2* (см. рис. 10, *а*). Затем — кулоновское взаимодействие частиц *1—2* отдельно от взаимодействия пробной частицы со средой и образование вихревого движения частицы. Каждая частица имеет вращающееся вокруг нее поле, геометрия которого зависит от знака заряда (см. рис. 9, 10). Представленная в виде отрицательного заряда частица *1* в центре системы и окруженная частицами с положительными зарядами *2* система частиц (см. рис. 10, *а*) образует среду как сумму вращающихся полей частиц с суммарной массой среды $1/r_{me} = \sum 1/r_{mi}$. Под влиянием симметричного окружения зарядами *2* система находится в равновесии. Далее под влиянием флуктуаций возникает локальное нарушение симметрии при сдвиге заряда *2′* и тем самым нарушение равновесия всей системы (см. рис. 10, *б*). Происходит взаимодействие между отрицательным зарядом *1* и зарядом *2′* с нарушенным при флуктуации равновесием. Уберем симметрично расположенные положительные частицы *2* и рассмотрим систему из двух взаимодействующих друг с другом частиц *1* и *2′* (см. рис. 10, *б*). Расстояние между частицами равно модулю радиус-вектора $r_{12дi}$ взаимодействующих частиц *1—2* (см. рис. 10, *в*).

Кулоновское взаимодействие пробной частицы (электрона) с противоположной частицей (протоном, позитроном) происходит на фоне среды. Испускаемые в результате реакции фотоны разлетаются в виде перекрестных потоков. При реакции взаимодействия электрона и позитрона ($e^- + e^+ \to \gamma + \gamma$) разлет фотонов происходит либо под прямым углом, либо под углом 60° в зависимости от ориентации спинов частиц [18—37]. Соотношение между перекрестными потоками разной природы, например, потоками тепла и частиц, соответствует принципу взаимности Л. Онзагера и позволяет установить геометрическую взаимосвязь между перекрестными потоками тепла (фотонами) и частиц (потоков вещества).

Рассмотрим реакцию взаимодействия положительных и отрицательных зарядов электрона и протона (или позитрона) с образованием атома водорода. Разлет продуктов реакции происходит под углом 90°. При кулоновском притяжении пробная частица (электрон) движется навстречу положительной частице в потенциальном поле последней. Потенциальное векторное поле положительного заряда вызывает ускоренное спиральное движение электрона с возникновением вращения типа вихревого. При достижении скорости электрона $1/\alpha$ происходит излучение поляризованного фотона с переходом электрона в новое состояния с энергией 13,6 эВ, что составляет $1/\alpha$ от полной энергии электрона. Образуется атом водорода с вихревым движением электрона вокруг ядра атома (протона) [10—12]. Фотон с энергией 13,6 эВ излучается под углом 90° в среду и движется вдоль геодезической поверхности, которая представляет собой эквипотенциальную поверхность в инерциальной системе отсчета. Движение фотона в ИСО происходит с постоянной скоростью света в вакууме c_0 вдоль геодезических линий. Именно равномерная плотность среды ρ_c, и, как следствие, постоянная кривизна пространства-времени обеспечивают постоянство скорости света.

Возникновение вихревых кристаллических структур

Образование вихревых структур — следствие фазового перехода потока частиц в новое состояние при перекрестном излучении тепловых квантов (см. рис. 12). Фотон испускается под углом 90° (или 120° в зависимости от направления спина) к направлению движущейся частицы (атома) в перекрестных потоках тепла и вещества [16].

Рассмотрим тепловое движение частиц на поверхности растущего покрытия как броуновское движение. Движение без диссипации энергии соответствует принципу наименьшего действия, соответствующему движению вещества по пути наименьшего сопротивления. Движение прямолинейное и равномерное невозможно.

Среда определяет свойства и геометрию элементарных частиц типа электрона.

Гравитационное взаимодействие подобно межмолекулярному взаимодействию и образует планетарное строение Солнечной системы. Однако наблюдается подобие между вихревым планетарным строением последней и ростом вихревых кристаллических структур [10—12]. Все частицы в реальном мире асимметричны и состоят из отдельных фрагментов, но если измерение свойств частиц происходит в течение достаточно длительного времени, то эти частицы можно считать условно симметричными и сферическими. Определяющей является угловая частота колебаний электрона.

Сверхнизкое трение, сверхпроводимость и сверхтекучесть — родственные явления, определяемые фазовым переходом при критической величине характерного параметра (преодоление потенциального барьера).

Вихревые атмосферные потоки, возникающие как совокупность воздушных течений в атмосфере над земной поверхностью, подобны рассмотренным выше вихревым явлениям. Причина вихревых структур — процессы диффузии частиц под влиянием перекрестных потоков тепла и вещества. Согласно принципу взаимности, влияние потока тепла на поток вещества должно соответствовать влиянию потока вещества на поток тепла [24]. Движение вещества соответствует принципу минимума диссипации энергии, поэтому потоки частиц перемещаются по энергетически выгодным поверхностям атмосферных структур. Тем самым происходит самоорганизация системы частиц в атмосфере, которая должна быть открытой по отношению к окружающей среде и стремится к неразрывности [24, 25].

На основе атомно-кластерной модели (АКМ) роста покрытий в вакууме изучена подвижность частиц на поверхности растущих покрытий под воздействием тепловых потоков [4—22]. Потоки тепла возникают от частиц осаждаемого вещества и от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося преимущественно по эквипотенциальным поверхностям растущего покрытия. В случае превышения тепловой энергии частиц потенциальных барьеров поверхности возможна поверхностная миграция (диффузия) частиц. В центре подложки плотность максимальна, по мере удаления на периферию плотность осаждаемого вещества уменьшается по закону косинуса. Поступающий от катода (испарителя вещества) поток частиц при осаждении сначала движется по поверхности подложки в потенциальном поле с градиентом плотности от центра на периферию. Осажденная частица вступает в равновесие с подложкой и с перекрестным излучением фотона переходит в состояние вихревого поля с круговым движением. В результате фазового перехода радиальное движение частиц сменяется на круговое движение с образованием вихревого потока вещества.

Явление образования перекрестных потоков вещества разной природы (например, потоков тепла и частиц вещества) довольно распространено в природе. Например, это происходит при излучении фотонов атомами вещества. Рассмотрим, например, реакцию превращения частиц $e^- + e^+ = 2\gamma$ в излучение (аннигиляция) и излучение фотонов [20—22] (рис. 13). При соответствующих условиях возможно образование из фотона электрон-позитронной пары, и наоборот, при слиянии электрона и позитрона образование в зависимости от направления спина частицы двух или трех фотонов, разлетающихся в противоположных направлениях либо под углами 120°. Такая реакция взаимодействия электрон-позитронной пары приводит к возникновению двух (или трех) фотонов с энергией, равной энергии электрона и позитрона $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$.

Предложенная АКМ роста кристаллов связана с наличием на поверхности растущего покрытия двух фаз (конденсированной B_a и мигрирующей C_c) и возникающих вследствие этого нелинейных фазовых переходов в растущих слоях наносимых покрытий. Основной принцип модели — определение длины свободного пробега осаждаемых частиц l_0 по поверхности подложки:

$$l_0 = an^{1/2}, \qquad (15)$$

где a — период решетки вещества;

n — число перескоков из одного адсорбционного центра в другой [8, 9].

Потоки тепла определяют количество мигрирующей фазы, с ростом температуры увеличивается число мигрирующих частиц. Модель роста позволяет объяснить возникновение фазового перехода типа кристаллизации в диапазоне температур с формированием крупнокристаллического строения покрытий

$$L_n = A_{\text{в}}[(1 - \varepsilon_{\text{м}})B_a + \varepsilon_{\text{м}}C_c]^{1/2}, \qquad (16)$$

где B_a — количество конденсированной фазы;

C_c — количество мигрирующей фазы;

$A_{\text{в}}$ — параметр, зависящий от свойств наносимого вещества;

$\varepsilon_{\text{м}}$ — число частиц с энергией, превышающей потенциальный барьер поверхности U_b, $\varepsilon_{\text{м}} = D\int_{Ub}^{Ur}\left(\frac{dN}{d\text{v}}\right)dt$;

D — коэффициент пропорциональности;

U_r — энергия связи частицы с поверхностью.

Соотношением количества конденсированной B_a и мигрирующей C_c фаз выражается соотношение двух потоков вещества — скорости миграции и скорости роста монослоя.

Частицы на поверхности с энергией $U_b < E_T < U_r$ подчиняются максвелловскому распределению по скоростям $dN/d\text{v}$ (рис. 14).

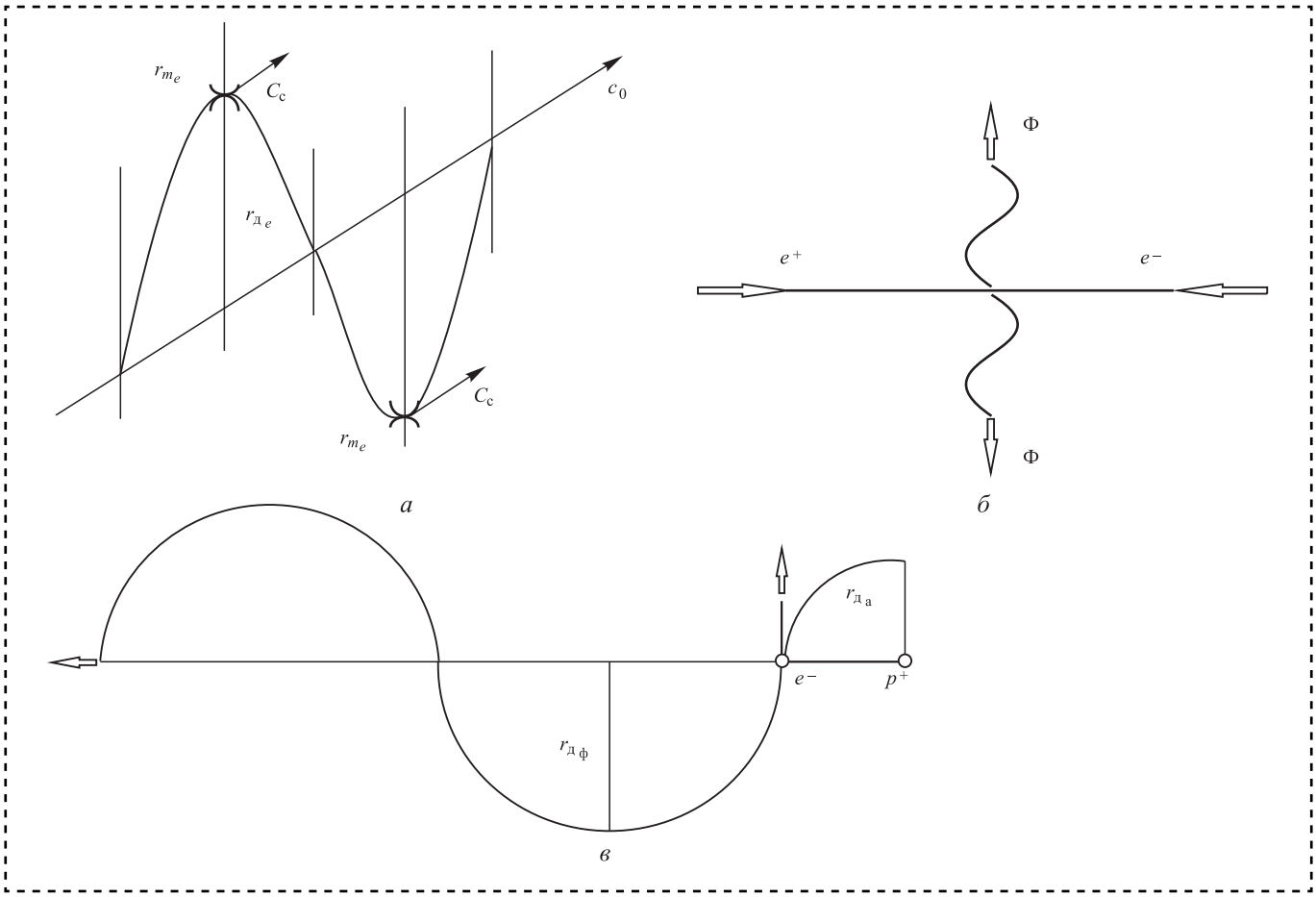


Рис. 13. Фотон:

а — объемный вид фотона; *б* — распад электрона и позитрона на два фотона; *в* — излучение фотона атомом водорода: $r_{дф}$ — дебройлевский радиус фотона; $r_{да}$ — комптоновский радиус атома водорода

Формула (16) показывает, как частица из неподвижного равновесного состояния через фазовый переход приходит к другому равновесному состоянию движения с постоянной скоростью по поверхности растущего кристалла.

Неподвижная частица имеет собственный момент количества движения, который равен моменту количества движения потока поля среды, при этом частица находится в равновесии со средой. Нарушение равновесия происходит при возникновении возмущения среды, например, с появлением возмущающей частицы. Асимметричное возмущение поля среды вызывает движение пробной частицы соответственно притяжению или отталкиванию поля возмущения. Во время движения происходит деформация пробной частицы с возникновением фазового перехода при критической величине характерного параметра (потенциального барьера). Фазовый переход приводит к перекрестному излучению фотонов в виде потоков тепла с передачей вихревого движения частиц растущего кристалла. В поверхностном слое частиц после фазового перехода в случае отсутствия конденсированной фазы сохраняется только мигрирующая фаза:

$$K_c = A_a(\varepsilon_м C)^{1/2}.$$

На поверхности покрытий (см. рис. 2—5) просматриваются вихревые образования как следствие вихревого движения перекрестных потоков осаждаемого вещества в процессе нанесения покрытия. Следовательно, причиной образования вихревых структур кристаллов при нанесении ионно-плазменных покрытий является фазовый переход от потенциального векторного поля в вихревое поле потоков осаждаемого вещества на поверхностях растущих ионно-плазменных покрытий. Такой фазовый переход частицы из одного состояния в другое сопровождается вихревым перекрестным излучением фотонов с возникновением вихревого движения частиц [4—12].

Из проведенных экспериментов и теоретических исследований диссипативных систем

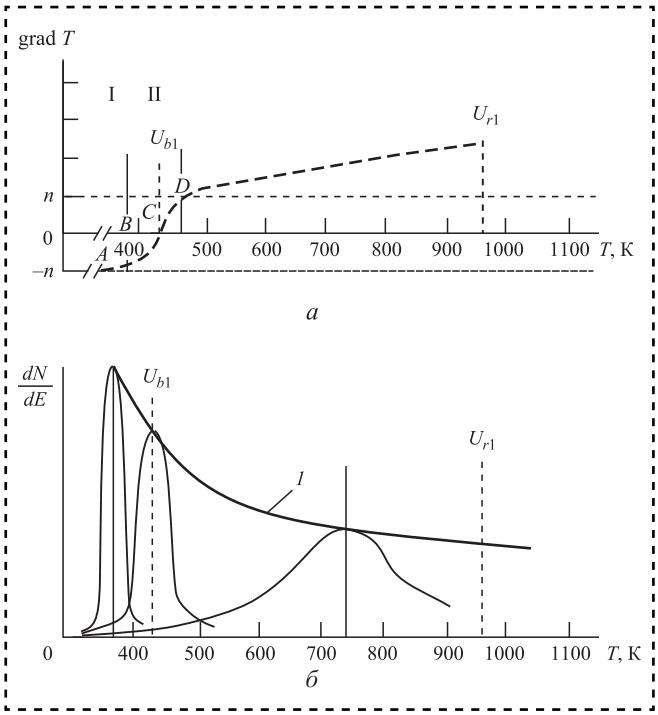


Рис. 14. Зависимость градиента температуры (*а*) и распределения частиц по энергиям (*б*) от температуры:
1 — огибающая точек перегиба кривых распределения по энергиям частиц MX_2 (*1* или *2*); $U_{b1,2}$ — потенциальный барьер поверхности MX_2 (*1* или *2*); $U_{r1,2}$ — энергия связи MX_2 (*1* или *2*); *A* — точка роста поликристаллической фазы; *B* — точка условного начала фазового перехода; *C* — точка перегиба функции; *D* — точка начала роста текстурированного покрытия

следует наличие скрытых параметров, определяющих наряду с сильным близкодействием возникновение более слабого дальнодействующего. Запутанные состояния спаренных частиц — неотъемлемая часть физической реальности. Возникает поток в новом спутанном состоянии спаренных частиц в виде фазового перехода с преодолением потенциального барьера и ростом количества вещества в этом состоянии. В любом случае количество парных частиц составляет практически 100 %, и все частицы участвуют в тех или иных взаимодействиях.

Согласно теореме Дж. С. Белла, в потоке содержится больше половины дальнодействующих спутанных (парных) частиц, которые ответственны за возникновение и рост вихревых кристаллических структур. В основе вихревого движения лежит принцип суперпозиции, суть которого заключается наряду с путаным взаимодействием в участии в общем взаимодействии с другими частицами. Неравенства Дж. С. Белла справедливы для диссипативных статистических систем, в которых невозможно движение самих частиц со скоростью больше скорости света (требование принципа локальности) [32—37]. Рассмотрение частицы с дальнодействующим полем как единого целого с существованием принципа суперпозиции (см. уравнения (1)—(10)) позволяет применить наряду с близкодействием на больших расстояниях принцип дальнодействия — скрытые параметры (например, собственные колебания частиц). В данной работе для описания всего комплекса взаимодействий предлагается использовать для частицы с полем как единого целого обе теории взаимодействия и применять их для описания систем достаточно большого количества частиц.

Наличие дальнодействия и близкодействия обеспечивает возможность взаимосвязи всех частиц с полями Вселенной как единой диссипативной системы в течение достаточно малого промежутка времени. Обнаружено подобие явлений, в основе которых лежит вихревая природа частиц, из которых формируется Периодическая система элементов. Частоту флуктуационных микроколебаний такой системы достаточно сложно экспериментально измерить макроприборами.

Заключение

Причина возникновения вихревого движения частиц — фазовые переходы частицы из одного состояния в другое с перекрестным излучением фотонов. В природе не существует идеального прямолинейного движения, в реальном мире геометрия является неэвклидовой (сферической). Поэтому в связи с отсутствием прямолинейной евклидовой геометрии на сфере потоки вещества (атомов или молекул воды, атмосферы) на земной поверхности совершают сложное вихревое движение по криволинейным линиям. Вихревые потоки на первый взгляд различных физических процессов подобны.

Выводы

Экспериментально обнаружен нелинейный фазовый переход в диапазоне температур от аморфной структуры к кристаллической при нанесении ионно-плазменных покрытий.

Предложена атомно-кластерная модель роста покрытий в вакууме, в основе которой лежит воздействие тепловых потоков — частиц осаждаемого вещества и потока тепла от нагревателя с формированием перекрестного потока мигрирующих частиц, движущегося без диссипации по эквипотенциальным поверхностям растущего покрытия.

Исследовано явление вихревого переноса частиц без диссипации энергии вдоль эквипотенциальных

поверхностей, имеющее квантово-механическую природу. Перекрестный поток частиц энергетически равен вызываемой им скорости движения частицы. Осуществление такого движения вещества возможно по эквипотенциальным поверхностям слоистого твердого тела с особыми изоэнергетическими уровнями выше уровня Ферми, где образуется соответствующая энергетическая щель.

Среда как суперпозиция полей всей Вселенной определяет свойства и геометрию элементарных частиц типа электрона. Образование вихревых структур является следствием фазового перехода, определяемого плотностью среды. Движение в среде с постоянной длиной волны де Бройля определяется нарушением равновесия плотности среды ρ_c.

Прямолинейное движение является ускоренным. Ускорение происходит до достижения критической величины фазового перехода.

Движение без диссипации энергии осуществляется строго по эквипотенциальным поверхностям. Все взаимодействия пропорциональны кривизне среды и расстоянию между телами. Неравенства Белла справедливы для диссипативных систем частиц с квантовыми свойствами, позволяющих создавать вихревые структуры. Сжатие частицы при движении происходит поперек направления перемещения и образует вид спирали.

Установлено, что сверхнизкое трение, сверхпроводимость и сверхтекучесть являются родственными явлениями, определяемыми фазовым переходом при критической величине характерного параметра (преодоление потенциального барьера). Обнаружено подобие явлений (сверхнизкое трение, сверхпроводимость, сверхтекучесть, рост кристаллов в вакууме) и определены критерии подобия. Постоянная тонкой структуры и скорость света — критерии подобия строения частиц. Скорость света c_0 зависит от плотности среды ρ_n.

Нанесение композиционных легированных покрытий приводит к возможности получения сверхнизкого трения при нормальных условиях на воздухе и возрастанию долговечности покрытия в несколько раз.

Библиографический список

1. **Булаевский Л.Н.** Сверхпроводимость и электронные свойства слоистых соединений // УФН. 1975. Т. 116. С. 449.
2. **Babaev E., Speight M.** Semi-Meissner state and neither type-I nor type-II superconductivity in multicomponent superconductors // Phys. Rev. B 72. 180502(R). 2005.
3. **Moshchalkov V., Menghini M., Nishio T.** Type-1.5 Superconductivity // Phys. Rev. Lett. 102. 117001. 2009.
4. **Ноженков М.В.** Влияние структуры на сверхнизкое трение покрытий, нанесенных ионным распылением // Поверхность. 2015. № . 5 С. 100—112.
5. **Ноженков М.В.** Структура и свойства вакуумных ионно-плазменных покрытий // Поверхность. 2014. № 1. С. 54—63.
6. **Nozhenkov M., Michail V.** The ultra-low friction of layer structures // Mechanical Engineering Research. 2013. V. 3. N 2. P. 73—90.
7. **Nozhenkov M., Michail V.** Superlow interaction in layered structures // Global Journal of Researches In Engineering. 2014. V. 14-A. Iss. 2. P. 55—61.
8. **Ноженков М.В.** О слабых взаимодействиях частиц в твердых телах // Наноинженерия. 2012. № 3 (9). С. 41—47.
9. **Ноженков М.В.** Кристаллическая структура и свойства покрытий, наносимых вакуумными ионно-плазменными методами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 9. С. 38—48.
10. **Ноженков М.В.** Потоки подобных частиц без диссипации энергии // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 5—6. С. 38—48.
11. **Ноженков М.В.** Квантовые потоки как вихревые сверхструктуры // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Т. 18. № 3. С. 132—144.
12. **Ноженков М.В.** Вихревые потоки в диссипативных системах // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. Т. 18. № 2. С. 77—91.
13. **Сосов Е.Н.** Геометрия Лобачевского и ее применение в специальной теории относительности. Казань: КФУ. 2016. 84 с.
14. **Эйнштейн А.** Теория относительности. Ижевск: НИЦ РХД. 2000. 224 с.
15. **Дирак П.А.** Релятивистское волновое уравнение электрона // Успехи физических наук. 1979. Т. 129. Вып. 4. С. 681—691.
16. **Куни Ф.М., Щекин А.К., Новожилова Т.Ю.** Соотношения взаимности Онзагера в неравновесной термодинамике // Вестник Санкт-Петербургского университета. 2005. Сер. 4. Вып. 3. С. 125—129.
17. **Пригожин И., Кондепуди Д.** Современная термодинамика. М.: Мир, 2002. 461 с.
18. **Wollack Edward J.** Cosmology: The Study of the Universe // Universe 101: Big Bang Theory. NASA. 2010.
19. **Сажин М.В.** Современная космология в популярном изложении. М.: УРСС, 2002. 240 с.
20. **Веников В.А., Веников Г.В.** Теория подобия и моделирования. М.: Высшая школа, 1984. 439 с.
21. **Савельев И.В.** Курс общей физики. Т. 2. М.: Астрель, 2008. 336 с.
22. **Орир Дж.** Физика. Т. 1—2. М.: Мир, 1981.
23. **Фейнман Р.** Квантовая электродинамика. Новокузнецк: ФМИ, 1998. 216 с.
24. **Фейнман Р., Лейтон Р., Сэндс М.** Фейнмановские лекции по физике. М.: Мир, 1976. 440 с.
25. **Бьёркен Дж.Д., Дрелл С.Д.** Релятивистская квантовая теория. Т. 1. М.: Наука, 1978. 296 с.
26. **Каршенбойм С.Г.** Фундаментальные физические константы: роль в физике и метрологии и рекомендованные значения // УФН. 2005. Т. 175. С. 271—298.
27. **Каршенбойм С.Г.** Прогресс в уточнении фундаментальных физических констант: рекомендованные значения КОДАТА 2010. Т. 183. // УФН. 2013. С. 935—968.
28. **Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б.** Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1981. 428 с.
29. **Борн М.** Таинственное число 137* // УФН. 1936. Т. XVI. Вып. 6. С. 697—729.
30. **Каплан И.Г.** Введение в теорию межмолекулярных взаимодействий. М.: Наука, 1982. 312 с.
31. **Бараш Ю.С.** Силы Ван-дер-Ваальса. М.: Наука, 1988. 344 с.
32. **Баргатин И.В., Гришанин Б.А., Задков В.Н.** Запутанные квантовые состояния атомных систем // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 6. 625 с.
33. **Bell J.S.** On the Einstein Podolsky Rosen Paradox // Physics 1, 3. 1964. P. 195—200.
34. **Einstein A., Podolsky B., Rosen N.** Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete? // Phys. Rev. 47 (10). 1935. P. 777—780.
35. **Aspect A., Dalibard J., Roger G.** Experimental test of Bell's inequalities using time-varying analyzers // Phys. Rev. Lett. 49. 1982. P. 1804—1807.
36. **Simon Gröblacher et al.** An experimental test of non-local realism // Nature. V. 446. 2007. P. 871—875.
37. **Aspect A.** Quantum mechanics: To be or not to be local // Nature. V. 446. P. 866—867.

УДК 621.71

Е.И. Самаркина, А.И. Самаркин, С.И. Дмитриев, *канд-ты техн. наук,* **Е.А. Евгеньева**
(Псковский государственный университет)
E-mail: dmitrievsi55@gmail.com

Электронная модель изделия как носитель конструкторско-технологической информации

Рассмотрены новые инструменты САПР, позволяющие разрабатывать аннотированные 3D-модели деталей и сборок.

New CAD tools are being considered to allow the development of annotated 3D-models of parts and assemblies.

Ключевые слова: САПР, электронная геометрическая модель изделия, метод аннотированной модели, конструкторско-технологическая информация.

Keywords: CAD, electronic geometrical model of a product, method of the annotated model, design and technological information.

Современная конструкторско-технологическая практика во многом ориентирована на применение трехмерных объемных моделей вместо традиционных двумерных чертежей. Нормой становится передача информации в виде электронных документов, а не на бумажных носителях. В связи с этим возникает проблема стандартизации понятий, терминов и правил реализации 3D-моделей и их практическое использование.

На рис. 1 приведены виды конструкторских документов (КД) согласно ГОСТ 2.102—2013.

Ранее законодательно ГОСТами регламентировалось обязательное создание бумажных чертежей и спецификаций на основе электронных двумерных чертежей.

В настоящее время в мировой инженерной практике применяется два метода организации и представления данных об изделии с использованием САПР:

— метод графических листов (модель и чертеж);

— метод аннотированной модели.

В первом случае разрабатывается трехмерная модель (отдельной детали или сборки), на ее основе формируется двумерный чертеж, содержащий виды трехмерной модели и аннотирующую информацию. Виды чертежа ассоциативно связаны с исходной моделью, так что при ее изменении происходит и перерисовка видов на чертеже.

Рис. 1. Виды конструкторских документов согласно ГОСТ 2.102—2013

Этот подход до недавнего времени и реализовывался в Российской Федерации. Конструкторско-технологическая информация обычно указана на графическом листе чертежа и отсутствует на трехмерной модели. Документацией при таком моделировании являются готовые к печати чертежи.

Основная работа конструктора обычно связана с разработкой 3D-модели, которая наиболее информативна, по сравнению с чертежом более наглядна, особенно в случае со сложными изделиями. Наличие множества разрезов, выносных элементов на нескольких листах чертежа большого формата затрудняет восприятие вносимых в конструкцию изменений или новых решений. Для восприятия необходимо воссоздать по проекциям форму изделия, а уже потом вникать в суть изменений. Но без чертежей нельзя зафиксировать конструкторские решения для последующих этапов подготовки производства.

На рис. 2 приведена последовательность работ при применении метода графических листов.

В последние годы появились новые инструменты САПР, позволяющие разрабатывать аннотированные 3D-модели. При этом вся конструкторско-технологическая информация, связанная с геометрией модели, указывается непосредственно в трехмерном пространстве.

Принципиальное отличие аннотированной 3D-модели заключается в добавлении конструкторско-технологической информации в 3D-модель, а не на чертеж, и наличии этапа публикации видов 3D-модели.

Таким образом, вся необходимая конструкторско-технологическая информация сосредоточена в одном файле геометрической аннотированной модели, и рассматривать трехмерные аннотированные модели можно как полноценную замену электронным и распечатанным чертежам.

На рис. 3 приведена последовательность работ при применении метода аннотированной модели.

С появлением новых инструментов САПР потребовалась разработка новых регламентов и ГОСТов, а также введение изменений в существующие стандарты. За основу взяты международные стандарты ISO и ASME (стандарты американского общества инженеров-механиков).

ГОСТ 2.052—2015 "Электронная модель изделия" утверждает общие требования к выполнению электронных моделей изделий машиностроения и приборостроения (электронных геометрических моделей изделий);

ГОСТ 2.053—2013 "Электронная структура изделия" устанавливает требования к выполнению электронной структуры изделий всех отраслей промышленности;

ГОСТ 2.058—2016 "Правила выполнения реквизитной части электронных конструкторских документов" вводит правила выполнения в электронной форме реквизитной части электронных конструкторских документов на изделия машиностроения и приборостроения, предусмотренных стандартами Единой системы конструкторской документации.

Внесены изменения в ГОСТ 2.102—2013 "Виды и комплектность конструкторских документов" и ГОСТ 2.051—2013 "Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Электронные документы. Общие положения".

Рассмотрим рекомендации и правила оформления по ГОСТ 2.052—2015 "Электронная модель изделия" и как они согласуются с возможностями САПР.

ГОСТ 2.052—2015 определяет электронную модель изделия (ЭМИ) как сущность, воспроизводящую свойства реального изделия, которую создают с помощью программного обеспечения.

Электронная геометрическая модель изделия (ЭГМИ) представляет собой совокупность геометрических элементов, определяющих геометрию и свойства изделия, зависящие от формы и размеров. Выделяют электронную модель детали и электронную модель сборочной единицы.

Определены три типа моделей по математическому способу построения: каркасная, поверхностная, твердотельная.

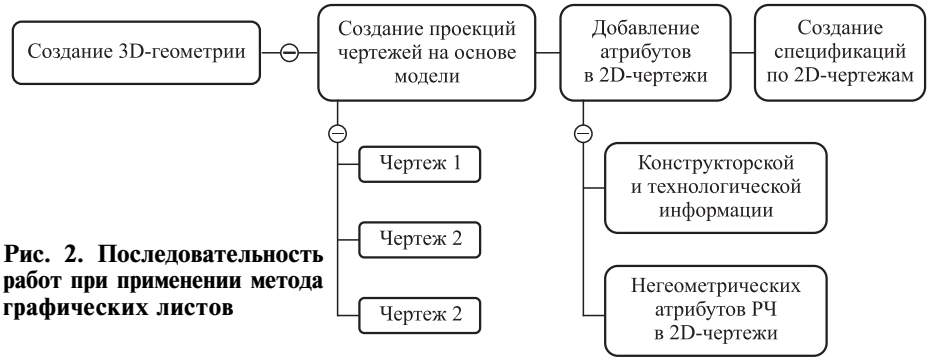


Рис. 2. Последовательность работ при применении метода графических листов

Законодательная база, регламентирующая состав, содержание и способы информационного наполнения ЭГМИ, приведена в виде схемы на рис. 4.

Состав геометрической модели определяется реквизитной и содержательной частями. Содержательная часть включает в себя геометрические элементы, из которых состоит модель.

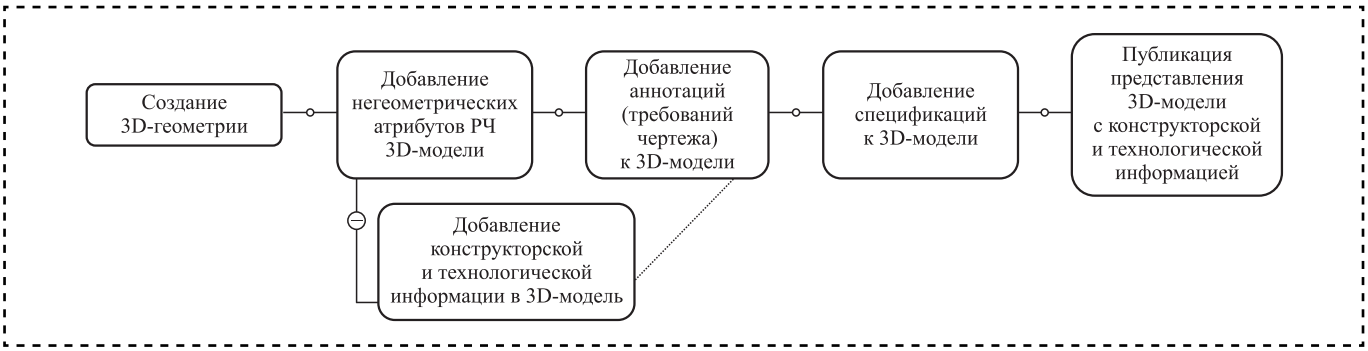


Рис. 3. Последовательность работ при применении метода аннотированной модели

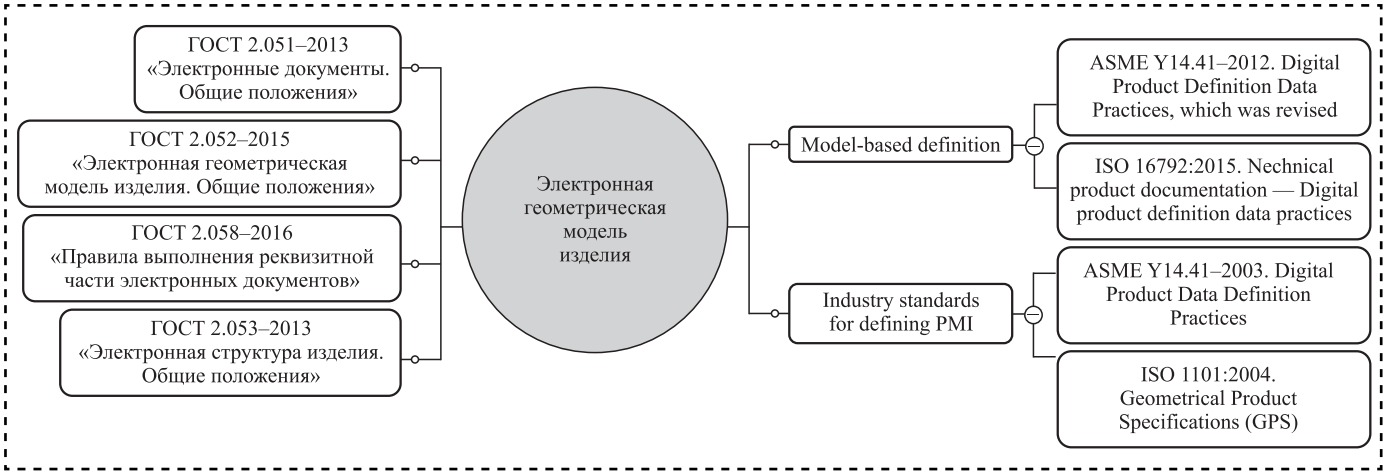


Рис. 4. Законодательная база, регламентирующая состав, содержание и способы информационного наполнения ЭГМИ

В ГОСТе сформулированы требования к их созданию и оформлению.

На рис. 5 на стр. 3 обложки приведен пример твердотельной модели детали с рекомендациями ГОСТа к форме и составу информации, описывающей геометрические элементы ЭГМИ, реализуемые средствами САПР.

Анализируя основные положения ГОСТа можно сделать следующие выводы:

1. Принципиальные отличия требований к составу информации, описывающей геометрические построения на чертеже и на геометрической модели, отсутствуют.

2. Ориентация в пространстве 3D-модели в САПР осуществляется расположением координатной системы модели, поэтому чтобы была определенность представления, имеются рекомендации по расположению координатной системы модели. Это особые рекомендации, характерные для 3D-моделирования. При формировании чертежа используются виды и проекции.

3. Рекомендации по созданию геометрических элементов по номинальным размерам позволяют упростить автоматическое определение размеров для аннотирования модели и при использовании модели для создания чертежа. Это не требование, а рекомендация, так как для прочностных расчетов можно создавать модели по средним размерам, максимальным или минимальным, в зависимости от постановки задачи.

4. Поскольку электронные модели вместе с продукцией имеют международное использование, то требования к единицам измерения и точности размеров (число разрядов после запятой) устанавливает заказчик, а САПР позволяет, изменив настройки, обеспечить требования заказчика.

Производители систем автоматизированного проектирования учитывают, как международные стандарты, так и требования российских ГОСТов путем настройки САПР на определенный шаблон оформления.

Современные модули аннотирования 3D-модели (например, Siemens NX/PMI, SOLIDWORKS MBD) позволяют добавлять техническую информацию (вручную и автоматически), такую как размеры, заметки и другие особые требования в трехмерный цифровой набор данных, в файл геометрической модели (рис. 6).

Технологическую информацию ЭГМИ (размеры с допусками, шероховатость) можно ис-

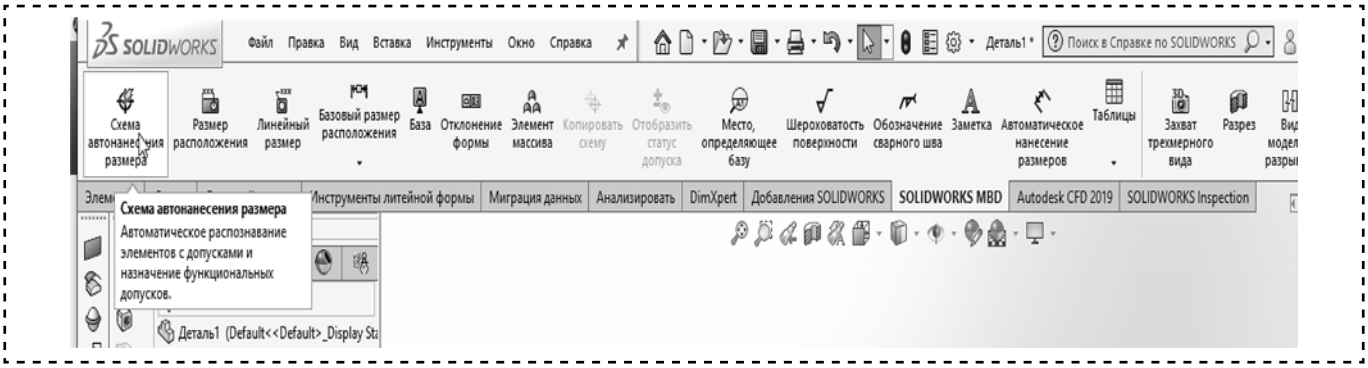


Рис. 6. Инструменты автоматической и ручной вставки размеров и геометрических допусков и других атрибутов в SOLIDWORKS

пользовать в других подсистемах САПР. Так, модуль САМ использует информацию о допусках при назначении этапов обработки и при расчете траектории движения инструмента.

Например, номинальный размер шейки вала указан как 20, тогда как аннотированный — $20^{-0,1}_{-0,2}$. Модуль САМ, считав эту информацию, запрограммирует обработку на диаметр 19,85, т.е. средний диаметр.

Требования к атрибутам модели по содержанию в основном соответствуют чертежным с той лишь разницей, что атрибуты привязаны к 3D-модели.

Алгоритм использования инструментов аннотирования 3D-модели включает создание слоев и видов. Слой содержит группу аннотирующих элементов, обычно связанных между собой. Например, слой может включать все размеры или все диаметральные размеры. Слой также может включать размеры определенной части детали (например, размеры координирующих отверстий штампа). Элементы слоя могут быть отображены или погашены как единое целое, а также могут иметь единообразное оформление (например, все размеры будут зеленого цвета).

В свою очередь, виды в настоящем контексте представляют собой определенную точку, с которой удобно просматривать аннотации (например, профиль вала или вид на опоры редуктора). Имеется возможность отображать и гасить слои в зависимости от выбранного вида.

Часто аннотирующие элементы сосредотачиваются на одной плоскости (или

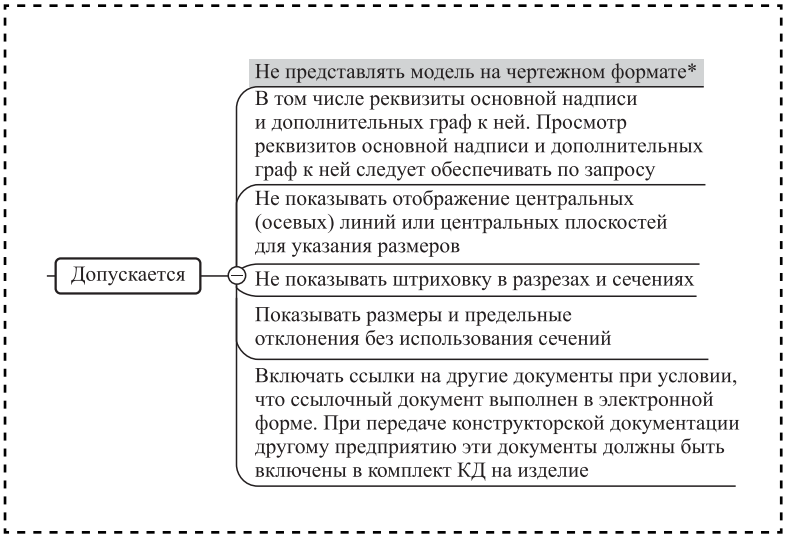


Рис. 7. Допущения при визуализации (отображении) ЭГМИ

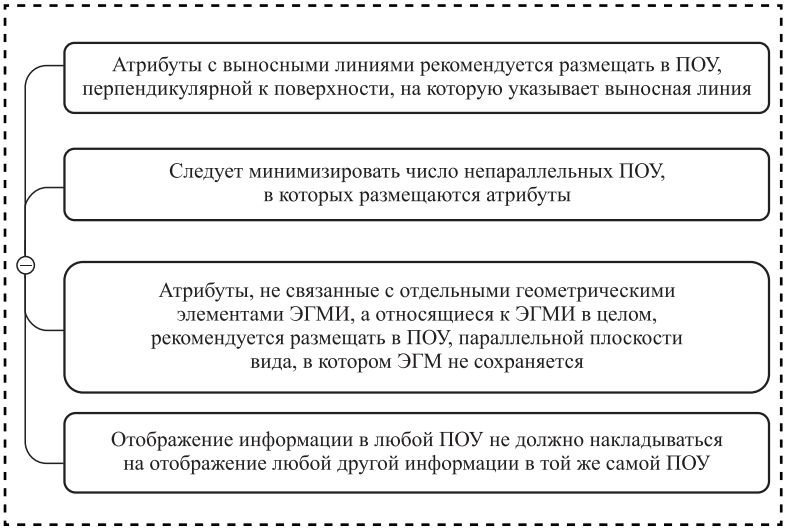


Рис. 8. Требования к плоскостям обозначений и указаний (ПОУ)

специально созданной или расположенной по нормали к текущему виду на модель) — плоскости обозначений и указаний (ПОУ) — еще один способ агрегации аннотаций.

Эти средства помогают предотвратить информационную перегрузку, когда вся информация включается без какой-либо организации.

При некоторых особых требованиях к размещению конструкторско-технологической информации в пространстве аннотированной модели некоторые чертежные требования становятся необязательными: штриховки, осевые линии, основные надписи, размеры на сечениях др. (рис. 7). В частности, ПОУ создаются таким образом, чтобы конструкторско-технологическая информация не накладывалась одна на другую (рис. 8).

На рис. 9 на стр. 3 обложки приведен пример ЭГМИ, показывающий, что регламент ГОСТа выполняется средствами SOLIDWORKS MBD.

Выводы

Метод аннотированных моделей предполагает не печать чертежей, а публикацию видов 3D-модели. Преимуществом является необязательность использования для просмотра печати и проверки САПР, в которой была разработана модель. Кроме того, опубликованные виды модели более информативны, чем чертежи.

Набор трехмерных цифровых данных может содержать достаточно информации для производства и проверки продукта без технических чертежей, т.е. отпадает необходимость в создании 2D-чертежей как самостоятельных конструкторских документов.

Недостаток метода — требуется специализированное программное обеспечение для просмотра, однако большинство фирм — производителей САПР предоставляют бесплатные программы-просмотрщики.

Стандарты ISO, а следовательно и ГОСТы, также, регламентируют структуру и способы предоставления аннотирующей информации для чтения любым другим соответствующим образом настроенным программным обеспечением.

Библиографический список

1. **ISO 16792:2015(en).** Technical product documentation — Digital product definition data practices [Электронный ресурс]. URL: https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:16792:ed-2:v1:en (дата обращения: 20.11.2018).

2. **Scott Knoche.** Embrace Model Based Definition // Quality magazine. 2006.

3. **Ma Qin Yi, Song Li Hua, Xie Da Peng, Zhou Mao Jun.** Development of CAD Model Annotation System Based on Design Intent // Applied Mechanics and Materials. 863. P. 368—372.

4. **Uski Pekka, Pulkkinen Antti, Koskinen Kari T.** Can a sheet metal product be manufactured without drawings? — Product lifecycle's point of view (PDF) // Proceedings of the 1st Annual SMACC Research Seminar 2016. Tampere: Tampere University of Technology. P. 109—111.

5. **Quintana Virgilio, Rivest Louis, Pellerin Robert, Kheddouci Fawzi.** Re-engineering the Engineering Change Management process for a drawing-less environment // Computers in Industry. 63 (1). P. 79—90.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 09.04.2019. Подписано в печать 03.06.2019. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.