



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Белорусский национальный
технический университет**

Кафедра «Технология машиностроения»

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ.
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛЫ**

Пособие

**Минск
БНТУ
2025**

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Технология машиностроения»

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ.
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА МАТЕРИАЛЫ

Пособие
для обучающихся, получающих углубленное
высшее образование (магистрантов) по специальности
7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением по образованию
в области машиностроительного оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2025

УДК 620.3+621.7/.9(075.8)
ББК 34.5я7
Ф60

С о с т а в и т е л ь
М. А. Белоцерковский

Р е ц е н з е н т ы:
профессор кафедры «Технология металлов» БГАТУ
д-р техн. наук, профессор *Л. М. Акулович*;
ведущий научный сотрудник ГНУ «Институт порошковой
металлургии имени академика О. В. Романа» *Л. В. Маркова*

Физические основы нанотехнологий. Высокоэнергетические методы воздействия на материалы : пособие для обучающихся, получающих углубленное высшее образование (магистрантов) по специальности 7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении» / сост. М. А. Белоцерковский. – Минск : БНТУ, 2025. – 84 с.
ISBN 978-985-31-0100-3.

В пособии рассматриваются вопросы прогрессивных технологий инженерии поверхности, современные достижения в области синтеза и изучения свойств материалов, содержащих наночастицы (углеродные нанотрубки, фуллерены), изложены принципы выбора наиболее рационального способа упрочнения – восстановления быстроизнашивающихся деталей машин и элементов конструкций. Пособие предназначено для студентов, получающих углубленное высшее образование (магистрантов) по специальности 7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении», а также может быть полезно студентам других специальностей машиностроительного профиля.

УДК 620.3+621.7/.9(075.8)
ББК 34.5я7

ISBN 978-985-31-0100-3

© Белорусский национальный
технический университет, 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ	5
1.1. Основные понятия и определения	5
1.2. Нанозффекты и нанообъекты в природе	8
1.3. Хронология развития нанотехнологии.....	10
1.4. Методы диагностики наноструктур.....	14
1.5. Атомно-молекулярная сборка (механосинтез)	24
1.6. Самоорганизация и самосборка	29
1.7. Структурные особенности наноматериалов	34
1.8. Углеродные наноструктуры	38
1.9. Нанотехнологии в машиностроении	44
2. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛЫ.....	47
2.1. Высокоэнергетические импульсные методы пластического формообразования деталей	48
2.2. Лазерное упрочнение	55
2.3. Плазменные технологические процессы в металлообработке и машиностроении.....	58
2.4. Метод ионной имплантации.....	67
2.5. Электронно-лучевые технологии.....	69
2.6. Ионно-лучевое упрочнение	72
2.7. Метод магнитно-электрического упрочнения	73
2.8. Газотермические методы формирования покрытий	76
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	82

ВВЕДЕНИЕ

Рассмотрены основные понятия и определения нанотехнологии, методы анализа и принципы конструирования объектов на наноуровне. Приведены сведения о структуре, свойствах и методах производства наноструктурных материалов. Рассмотрены основные направления практического применения нанотехнологий и наноматериалов в различных сферах.

Описаны виды восстановительно-упрочняющих технологий с использованием высокоэнергетических источников. Приведены данные о физических основах плазменной обработки материалов, плазменной наплавке и плазменному напылению покрытий. Рассмотрены особенности обработки лазерным и электронным лучом, области применения электронно-лучевых технологий, лазерной техники, магнитно-электрического упрочнения и газотермического напыления.

1. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

1.1. Основные понятия и определения

Нано- – десятичная приставка (в переводе с греческого nanos – «карлик»), означающая одну миллиардную часть какой-либо величины.

Наномасштаб подразумевает порядок размеров между 1 и 100 нанометрами ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм} = 10^{-3} \text{ мкм}$). На рис. 1.1 приведены размеры некоторых естественных и искусственных созданий природы в диапазоне размеров от 10 м до $1 \text{ \AA}$.

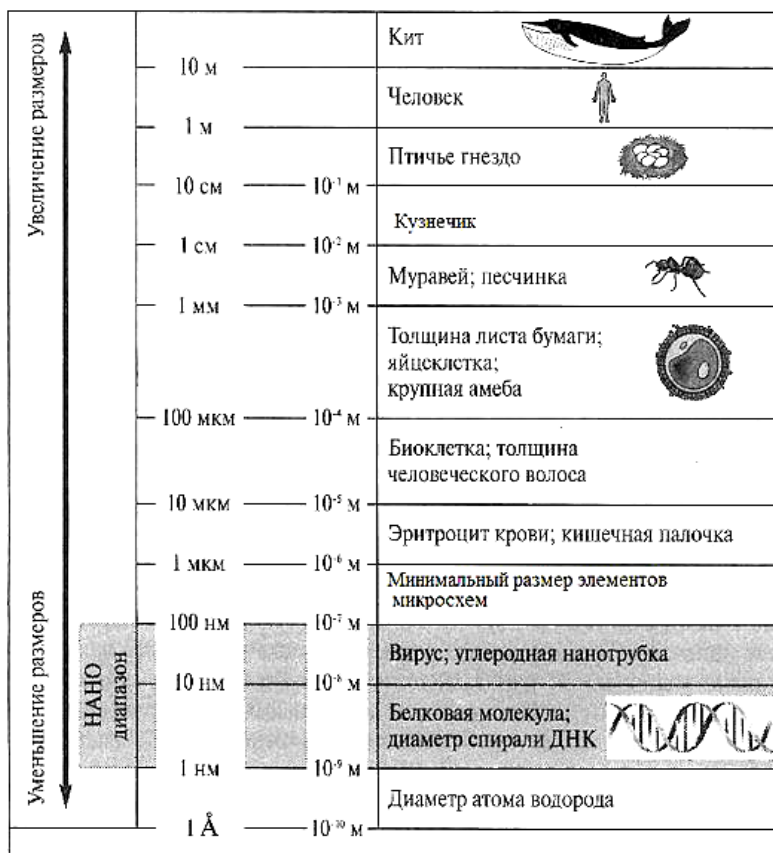


Рис. 1.1. Место наноразмерных объектов в окружающем мире

Нанотехнология и нанотехника – искусство создавать объекты с размерами – 1–100 нм и оперировать ими. Понятия *нанотехнология*, *наноструктурированные материалы* и *объекты* отчасти уже вошли в повседневную жизнь, ими называют приоритетные направления научно-технической политики в разных странах и в том числе в Беларуси. *Нанотехнология* – область прикладной науки и техники, занимающаяся созданием, изучением свойств и применением наноматериалов, разработкой и применением устройств на базе наноматериалов, а также устройств, работающих в наноразмерном диапазоне.

Наноматериалы – это материалы, содержащие структурные элементы, по крайней мере одно измерение которых не превышает 100 нм, и обладающие качественно новыми свойствами, функциональными и эксплуатационными характеристиками.

Номинально **наномир** представлен объектами и структурами, характерные размеры R которых измеряются нанометрами ($1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м} = 10^{-6} \text{ мм} = 10^{-3} \text{ мкм} = 10 \text{ \AA}$). Сама десятичная приставка *нано-* происходит от греческого слова *nanos* – карлик, что означает одну миллиардную часть чего-либо. Чисто формально в сферу нанонауки попадают объекты с характерными размерами R (хотя бы вдоль одной координаты), измеряемыми нанометрами. Реально диапазон рассматриваемых объектов и явлений гораздо шире – от отдельных атомов ($R < 0,1 \text{ нм}$) до их конгломератов и органических молекул, содержащих более 10 атомов (9 имеют размеры гораздо более 1 мкм в одном или двух измерениях).

Наиболее ярко специфика нанообъектов проявляется в области характерных размеров R от 0,1 нм до нескольких десятков нанометров. При таких размерах все свойства материалов и изделий (физико-механические, тепловые, электрические, магнитные, оптические, химические, каталитические и др.) могут радикально отличаться от макроскопических [1, 2].

Нанокристаллические (наноструктурные, наноструктурированные, нанофазные) материалы – материалы, у которых размер отдельных кристаллитов или фаз, составляющих структурную основу, не превышает 100 нм хотя бы в одном измерении. Объемные (массивные, компактные) наноматериалы – наноматериалы, состоящие из большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов), т. е. поликристаллические материалы с размером зерна 1–100 нм.

Консолидированные наноматериалы – компактные наноматериалы, пленки и покрытия из металлов, сплавов и соединений, получаемые методами порошковой технологии, интенсивной пластической деформации, контролируемой кристаллизации из аморфного состояния и разнообразными приемами нанесения пленок и покрытий.

Нанокластеры (атомные кластеры, наночастицы, атомные частицы) – низкоразмерные структуры, имеющие характеристические размеры менее 100 нм (1–100 нм), состоящие из десятков, сотен или тысяч атомов.

Фуллерены – особый вид нанокластерных структур; стабильные замкнутые сферические и сфероидальные многоатомные молекулы, поверхность которых образована правильными многогранниками из атомов углерода (или другого элемента), проявляющие истинно наноразмерные эффекты.

Нанотрубки – нитевидные наночастицы из атомов углерода или других элементов диаметром не более 100 нм, содержащие протяженную внутреннюю полость.

Нановолокна – нитевидные частицы диаметром не более 100 нм, не имеющие внутренней полости.

Квантовые точки, проволоки, ямы – искусственно созданные кластерные наноструктуры с размерным квантованием движения носителей заряда в трех, двух и одном направлениях соответственно.

Нанопорошки (ультрадисперсные порошки) – порошки с размером частиц менее 100 нм.

Наноструктурные (нанопокрывтия) покрытия – покрытия нанометровой толщины (нанослойные покрытия); покрытия с нанометровым размером кристаллитов (нанокристаллические покрытия).

Нанокompозиты – композиционные материалы с металлической, полимерной, керамической матрицей и наполнителем в виде наночастиц, нановолокон, нанослоев, а также композиционные материалы со сложным использованием нанокомпонентов.

Нанонаука – система знаний, основанная на описании, объяснении и прогнозировании свойств материальных объектов с нанометровыми характеристическими размерами или систем более высокого метрического уровня, упорядоченных или самоупорядоченных на основе наноразмерных элементов.

1.2. Нанозффекты и нанообъекты в природе

Нанотехнологии, безусловно, сегодня являются «передовой линией» развития цивилизации, ключевым понятием начала XXI века, символом новой, третьей, научно-технической (**наноиндустриальной**) **революции**, результаты которой обещают в будущем преобразить окружающий мир.

Вместе с тем *структуры и устройства нанометровых размеров существуют с незапамятных времен в живой и неживой природе*. Есть много примеров того, как человек только начинает открывать для себя явления и свойства наномира, которые природа давно освоила. Например, фуллерены обнаружены в небольших количествах в природных минералах (шунгитовые породы, сформировавшиеся около 2-х миллиардов лет назад), метеоритах и межзвездных газах. Предполагается, что газонаполненные фуллерены сыграли определенную роль в эволюции атмосферы Земли [1–3].

Биологические наноструктуры, которые были созданы в процессе природной эволюции, являются сегодня прототипом для создания искусственных наносистем.

Клетки живых организмов растут и делятся благодаря тому, что в них непрерывно идут взаимосвязанные процессы в наномасштабе. Если эти процессы останавливаются, клетки перестают быть живыми. Кстати, по одной из гипотез жизнь на Земле зародилась миллиарды лет назад в первичной субстанции из нанообъектов – липосом. Сегодня липосомы широко используют в нанотехнологиях.

Растение лотос замечательно тем, что его листья всегда остаются чистыми, в некоторых странах Востока это растение считают символом чистоты. Листья лотоса имеют уникальное строение поверхности, содержащей многочисленные нановолоски в виде острых пиков (рис. 1.2, *a*), которые обеспечивают супергидрофобные свойства. Именно этой структурой объясняется самоочистка листа и его водоотталкивающая способность. Капли воды скатываются с листьев лотоса, увлекая за собой инородные частицы. Это свойство получило название «эффект лотоса» [4–6].

Данный эффект наблюдается и у других растений (листья капусты, камыша, водосбора, тюльпана), а также у животных (крылья стрекоз и бабочек). Они наделены природным свойством защиты от различных загрязнений, в большей степени неорганического (пыль,

сажа), а также биологического (споры грибков, микробы, водоросли и т. д.) происхождения.

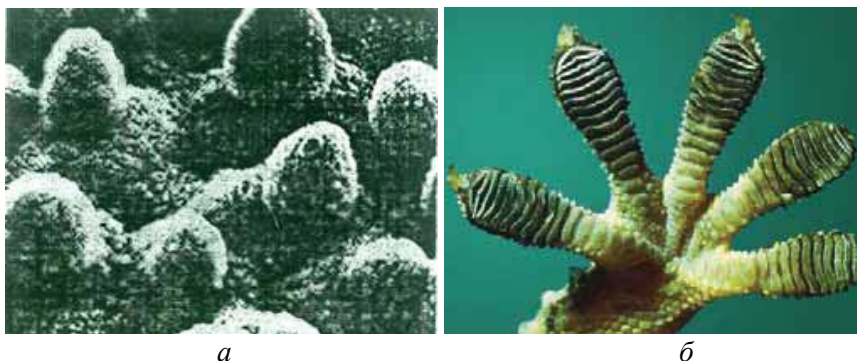


Рис. 1.2. Наноструктуры в живой природе:
a – листья лотоса под микроскопом; *б* – лапа геккона

Так как лотос-эффект основан исключительно на физико-химических явлениях и свойствах и не привязан только к живой системе, подобные поверхности могут быть технически воспроизведены. Сейчас нанотехнологии стремятся использовать этот эффект в разработках самоочищающихся стекол (для строений, автомобилей), тканей, супергидрофобных (ненамокаемых) покрытий [3, 7, 8].

Ящерица геккон перемещается, не догадываясь, что ей помогают законы наномира. На лапах ящерицы находится до миллиарда тончайших нановолосков особой формы (рис. 1.2, *б*), которые, соприкасаясь с поверхностью, притягиваются к ней за счет Ван-дер-Ваальсовых сил, действующих между молекулами (подобно «наноклею»). Эти крошечные силы в сумме удерживают вес геккона. Нанотехнологи уже создали экспериментальные аналоги таких «нанопупучек» на основе углеродных нанотрубок, которые можно будет использовать в разных областях деятельности (от высотных строительных работ, альпинизма до космических полетов); появился новый термин – «геккон-подобные материалы».

В природе для создания композитных структур, оптимизирующих механические свойства защитных и структурных компонентов позвоночных и беспозвоночных животных (костей, панцирей, раковин), используется нанокомбинация жестких и подвижных материалов. Та-

кие нанотехнологии, реализованные природой, существуют миллионы лет (перламутр, опал, яичная скорлупа, зубная эмаль и т. д.) [1, 9].

1.3. Хронология развития нанотехнологии [1–11]

«Отцом» нанотехнологии можно считать греческого философа Демокрита, который примерно в **400 г. до н. э.** впервые использовал слово «*атом*» для описания самой малой частицы вещества.

1661 г. – ирландский физик и химик Р. Бойль, один из учредителей Лондонского Королевского Общества, в труде «Химик-скептик» указал на потенциальную важность *мельчайших частиц – кластеров* («корпускул»). Критикуя воззрение Аристотеля о материи, состоящей из четырех первооснов (земли, огня, воды и воздуха), автор предположил, что все материальные объекты состоят из сверхмалых корпускул, которые достаточно устойчивы и в разных сочетаниях образуют различные вещества и предметы.

1857 г. – английский физик М. Фарадей, основоположник учения об электромагнитном поле, впервые получил устойчивые *коллоидные растворы* золота (жидкие системы с мельчайшими частицами дисперсной фазы, свободно и независимо друг от друга перемещающимися в процессе броуновского движения). Впоследствии коллоидные растворы стали широко использоваться для формирования наносистем.

1861 г. – английский химик Т. Грэм ввел *деление веществ по степени дисперсности структуры* на коллоидные (*аморфные*) и кристаллоидные (*кристаллические*).

Примером первого использования нанотехнологий можно считать изобретение в **1883 г.** американским изобретателем Д. Истменом, основателем известной компании *Kodak*, рулонной фотопленки, представляющей собой нанесенную на прозрачную эластичную основу (например, из ацетата целлюлозы) эмульсию галогенида серебра, разлагающегося под действием света с образованием *наночастиц чистого серебра*, которые и являются пикселями изображения.

1900 г. – немецкий физик М. Планк ввел понятие *кванта действия* (постоянная Планка) – исходного пункта для квантовой теории, положения которой существенны при описании поведения наносистем.

1905 г. – первым ученым, использовавшим *измерения в нанометрах*, принято считать известного физика Альберта Эйнштейна,

который теоретически доказал, что размер молекулы сахара равен одному нанометру (10^{-9} м).

1924 г. – французский физик *Луи де Бройль* выдвинул идею о волновых свойствах материи, положив тем самым начало *квантовой механике*, изучающей движение микрочастиц. Законы квантовой механики особенно актуальны при создании наноразмерных структур.

1931 г. – немецкие физики М. Кнолл и Э. Руска создали электронный просвечивающий микроскоп, ставший прообразом нового поколения устройств, которые позволили заглянуть в мир нанобъектов.

1939 г. – компания *Siemens* выпустила первый промышленный электронный микроскоп с разрешающей способностью 10 нм.

1959 г. – американский физик, Нобелевский лауреат Р. Фейнман в знаменитой лекции в Калифорнийском технологическом институте, известной под названием «Там, внизу, еще много места» (*«There's Plenty of Room at the Bottom»*), высказал идею управления строением вещества на атомарном уровне: «Научившись регулировать и контролировать структуры на атомном уровне, мы получим материалы с совершенно неожиданными свойствами и обнаружим совершенно необычные эффекты... Развитие техники манипуляции на атомарном уровне позволит решить многие проблемы. Эта лекция стала в определенном смысле стартовой площадкой для наноисследований.

1966 г. – американский физик Р. Янг, работавший в Национальном бюро стандартов, изобрел *пьезодвигатель*, применяемый сегодня в сканирующих зондовых микроскопах для точного позиционирования наноинструмента.

1968 г. – сотрудники научного подразделения американской компании *Bell* А. Чо и Д. Артур разработали *теоретические основы нанообработки поверхности*.

1971 г. – компаниями *Bell* и *IBM* получены первые полупроводниковые пленки одноатомной толщины – *квантовые ямы*, что послужило началом эпохи «практических» нанотехнологий.

1974 г. – впервые термин «нанотехнология» предложен японским физиком Н. Танигучи в докладе «Об основных принципах нанотехнологии» (*«On the Basic Concept of Nanotechnology»*) на международной конференции задолго до начала масштабных работ в этой области. Этот термин был использован для описания сверхтонкой обработки материалов с нанометровой точностью. Термином «нано-

техника» было предложено называть механизмы размером менее одного микрометра.

1981 г. – немецкие физики Г. Биннинг и Г. Рорер, сотрудники компании *IBM (International Business Machines Corporation)*, создали *сканирующий туннельный микроскоп* (Нобелевская премия 1986 г.) – первый прибор, позволяющий не только получать трехмерное изображение структуры из электропроводного материала с разрешением порядка размеров отдельных атомов, но и осуществлять воздействие на вещество на атомарном уровне, т. е. манипулировать атомами, а, следовательно, непосредственно собирать из них любое вещество.

1985 г. – коллектив ученых в составе Г. Крото (Англия), Р. Керла, Р. Смолли (США) открыл *новую аллотропную форму существования углерода в природе (фуллерен)* и исследовал его свойства (Нобелевская премия 1996 г.). Возможность существования сферических высокосимметричных молекул углерода была предсказана в 1970 г. японскими учеными Э. Осавой и З. Йошидой. В 1973 г. российские ученые Д. А. Бочвар и Е. Г. Гальперн теоретическими квантовохимическими расчетами доказали стабильность таких молекул.

1986 г. – создан *сканирующий атомно-силовой микроскоп* (авторы – Г. Биннинг, К. Куатт, К. Гербер, сотрудники *IBM*. Нобелевская премия 1992 г.), позволивший, в отличие от сканирующего туннельного микроскопа, изучать атомарную структуру не только проводящих, но и любых материалов, в том числе органических молекул, биологических объектов и т. д.

1987 г. – первый одноэлектронный транзистор создан американскими физиками Т. Футоном и Г. Доланом (компания *Bell Labs*). Французский физик Ж. М. Лен ввел в обиход понятия «самоорганизация» и «самосборка», ставшие ключевыми при конструировании нанообъектов.

1988–1989 гг. – двумя независимыми группами ученых под руководством А. Фера и П. Грюнберга открыто явление *гигантского магнитного сопротивления (GMR)* – квантовомеханического эффекта, наблюдаемого в тонких пленках из чередующихся ферромагнитных и немагнитных слоев, проявляющегося в существенном уменьшении электрического сопротивления в присутствии внешнего магнитного поля. Использование данного эффекта позволяет производить запись данных на жестких дисках с атомарной плотностью информации (Нобелевская премия 2007 г.).

1989 г. – продемонстрировано *первое практическое достижение нанотехнологии*: с помощью сканирующего туннельного микроскопа, произведенного фирмой *IBM*, американские исследователи Д. Эйглер, Э. Швейцер выложили три буквы логотипа компании («*IBM*») из 35 атомов ксенона путем их последовательного перемещения на поверхности монокристалла никеля.

1990 г. – коллектив ученых во главе с В. Кретчмером (Германия) и Д. Хаффманом (США) создал эффективную *технология синтеза фуллеренов*, что способствовало интенсивному изучению их свойств, определению перспективных областей их применения.

1991 г. – японским физиком С. Ииджима открыта новая форма углеродных кластеров – *углеродные нанотрубки*, которые проявляют целый спектр уникальных свойств и являются основой для революционных преобразований в материаловедении и электронике. В Японии начала реализовываться государственная программа по развитию техники манипулирования атомами и молекулами – проект «Атомная технология» (“*Atomic Technology*”).

1993 г. – в США организована *первая нанотехнологическая лаборатория*.

1998 г. – голландский физик С. Деккер создал *первый нанотранзистор на основе нанотрубок*. В Японии запущена программа «*Astroboy*» по развитию наноэлектроники, способной работать в условиях космоса.

1999 г. – американские ученые М. Рид и Д. Тур разработали *единые принципы манипуляции как одной молекулой, так и их цепочкой*. Элементная база микроэлектроники преодолела рубеж 100 нм.

2000 г. – подписание президентом США Биллом Клинтонem программы «Национальная нанотехнологическая инициатива» (ННИ). В преамбуле к ННИ Б. Клинтон заявил: «Я выделяю 500 миллионов долларов в текущем финансовом году на государственную ННИ, которая позволит нам создавать в будущем новые материалы (превосходящие существующие в тысячи раз), записать всю информацию библиотеки Конгресса на крошечном устройстве, диагностировать раковые заболевания при появлении нескольких зараженных клеток и добиться других результатов». Немецкий физик Р. Магерле предложил *технология нанотомографии* – создания трехмерной картины внутреннего строения вещества с разрешением 100 нм. Проект финансировала компания *Volkswagen*.

2004 г. – в Манчестерском университете (Великобритания) создан *графен* – материал со структурой графита толщиной в один атом, перспективный заменитель кремния в интегральных микросхемах (за создание графена ученым А. Гейму и К. Новоселову в 2010 г. присуждена Нобелевская премия).

2005 г. – компания *Altair Nanotechnologies* (США) объявила о создании *наноаккумулятора*.

2006 г. – исследователи из Северо-Западного университета США разработали *первый «печатный станок» для наноструктур* – установку, позволяющую производить в наноразмерном диапазоне одновременно более 50 тысяч наноструктур с атомарной точностью и одинаковым молекулярным шаблоном на поверхности, что является фундаментом для будущего массового производства наносистем. Американским ученым из *IBM* удалось впервые в мире создать *полнофункциональную интегральную микросхему на основе углеродной нанотрубки*. Д. Тур из университета Райса (США) создал *первую движущуюся наносистему – молекулярную машину* размером ~ 4 нм. Группа ученых из Портсмутского университета (Великобритания) разработала *первый электронный бионанотехнологический переключатель на основе ДНК*, который является перспективной основой для связи между «миром» живых организмов и «миром» компьютеров. Ученые из Калифорнийского технологического института (США) разработали *первый портативный биосенсор-анализатор крови* (портативную лабораторию, “*lab-on-chip*”).

2007 г. – компания *Intel* (США) начала выпускать *процессоры, содержащие наименьший структурный элемент размером ~ 45 нм*. Сотрудниками Технологического института (штат Джорджия, США) разработана технология сканирующей литографии с разрешением 12 нм.

Приведенные и другие исследования, открытия, изобретения дали мощный толчок применению нанотехнологических методов в промышленности. Началось бурное развитие прикладной нанотехнологии.

1.4. Методы диагностики наноструктур

Специфика свойств вещества в нанометровом масштабе и связанные с этим новые физические явления обусловлены тем, что характерные размеры элементов структуры нанообъектов находятся

в диапазоне, соответствующем среднему размеру атомов и молекул в обычных материалах. С этой точки зрения *наноструктуры следует рассматривать как особое фазовое состояние вещества.*

Свойства веществ и материалов, образованных структурными элементами в нанометровом интервале, в объемной фазе не определяются однозначно. Это вызвано тем, что изменения характеристик обусловлены не только уменьшением структурных элементов, но и проявлением квантовомеханических эффектов, волновой природой процессов переноса. В данной области не работают привычные законы классических технологий. С этой точки зрения нанотехнология является квантовой.

Управляя размерами и формой наноструктур, подобным системам можно придавать абсолютно новые функциональные свойства, резко отличающиеся от свойств обычных материалов. Характеристики наночастиц непрерывно изменяются в пространстве и во времени. Наличие больших пространственных и временных диапазонов, в свою очередь, вызывает достаточно большие изменения точности контролируемых характеристик. *Поэтому в методах расчета и экспериментального анализа характеристик наносистем одной из важнейших является проблема масштабирования, которая должна рассматриваться в трех разных аспектах или измерениях* [5, 11] (рис. 1.3).

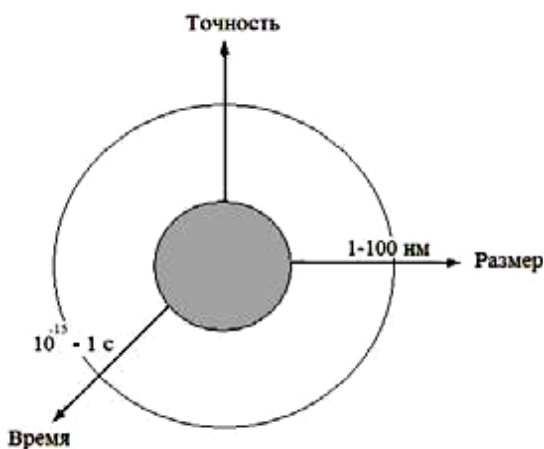


Рис. 1.3. Три аспекта изучения наносистем

Размер объектов, которые изучаются, может изменяться от $10^3 \text{ \AA}^0$ (1–100 нм). При этом количество частиц изменяется от 10^2 до 10^{10} . Во всем этом диапазоне можно с уверенностью говорить об атомном масштабе. *Ось «размер»* (рис. 1.3), представляет собой диапазон смен масштаба в исследуемой области. *Ось «время»* соответствует динамической (временной) смене масштаба событий, который весьма значителен, поскольку времена процессов, которые изучаются, изменяются на 15 порядков величины: от 1 фс (10^{-15} с) до 1 с. *Ось «точность»* предполагает указание диапазона смены точности расчетов и измерений различных величин. Повышение точности расчетов является необходимым условием как для разработки принципов конструирования материалов и понимания сути явлений, так и для сокращения количества дорогих и сложных экспериментов.

Для диагностики наноматериалов применяют такие методы исследования поверхности, как *дифракция электронов* (электронные просвечивающий и сканирующий микроскопы), *методы сканирующей зондовой микроскопии* (сканирующая туннельная микроскопия, атомно-силовая, магнитно-силовая микроскопия и т. д.), *рентгеновская спектроскопия и дифракция* (малоугловое рентгеновское рассеяние, рентгеновская спектроскопия поглощения), *электронная спектроскопия* (рентгеновская фотоэлектронная спектроскопия, ультрафиолетовая электронная спектроскопия, электронная Оже-спектроскопия), *оптическая и колебательная спектроскопия* (рамановская спектроскопия), *мессбауэровская* (гамма-резонансная) *спектроскопия*, *методы радиоспектроскопии* (ядерный магнитный резонанс, электронный парамагнитный резонанс), *нейтронография* и т. д. [6, 8, 10].

Это далеко не полный перечень «наноинструментария». Создание новых методов изучения наноматериалов продолжается. Дальнейшее развитие всевозможных методов диагностики *in situ*, учитывающих специфику нанообъектов и их характерные размеры, является неотъемлемой частью развития высоких технологий получения и анализа свойств наноструктур нового поколения. При этом формирование комплексных методов исследования диктуется как технологическими задачами получения наноструктур и создания на их базе следующего поколения электронных и оптических устройств, так и специфическими физическими, физико-химическими и топологическими свойствами, часто не укладывающимися в рамки стандартных представлений о свойствах вещества.

Принцип действия электронных микроскопов базируется на взаимодействии потока ускоренных заряженных частиц (электронов) с веществом.

В процессе этого взаимодействия формируются различные виды излучения (рис. 1.4), наиболее информативными из которых являются следующие:

1. *Рассеянное излучение электронов*, прошедших сквозь объект. Анализ данного излучения позволяет судить о топографии поверхности, особенностях зеренной структуры, фазовом составе, наличии и характере дефектов кристаллического строения [7, 11].

2. *Излучение вторичных электронов*, которые генерируются тонкими приповерхностными слоями (нескольких нанометров). Это излучение весьма чувствительно к состоянию поверхности и несет информацию о ее рельефе [7, 11].

3. *Излучение отраженных электронов*, т. е. электронов, отраженных от образца упругим рассеянием (глубина генерации нескольких микрометров). Интенсивность сигнала напрямую связана со средним атомным номером исследуемой области образца, поэтому, кроме информации о морфологии поверхности, данный вид излучения содержит данные и о составе [7, 11].

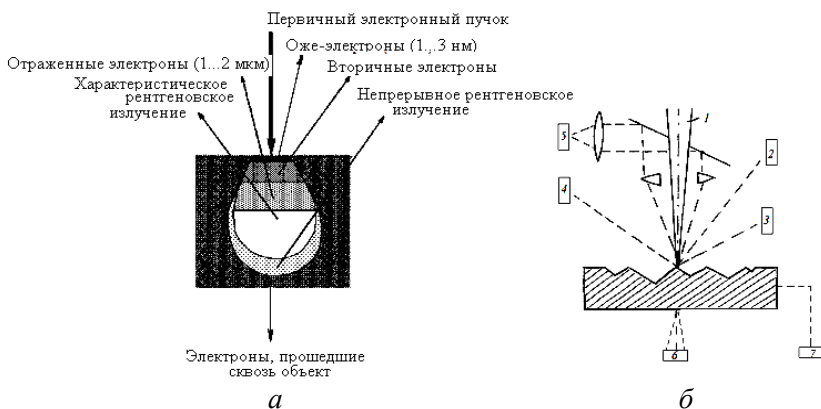


Рис. 1.4. Виды излучения, формирующиеся при взаимодействии электронов с поверхностью материала и схема регистрации информации об объекте в сканирующем электронном микроскопе:

a – виды излучения; *б* – схема регистрации; 1 – первичный пучок электронов; 2 – детектор вторичных электронов; 3 – детектор рентгеновского излучения; 4 – детектор отраженных электронов; 5 – детектор светового излучения; 6 – детектор прошедших электронов; 7 – детектор поглощенных электронов

Характеристическое рентгеновское излучение – излучение, генерируемое в случаях, когда электронный луч «выбивает» электроны с внутренних оболочек атомов образца, заставляя электроны переходить с более высокого энергетического уровня на нижний с испусканием кванта рентгеновского излучения. Анализ спектра позволяет определять элементный состав микрообъемов образца [7, 11].

Просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ, в англоязычной литературе – TEM) основана на формировании увеличенного изображения объекта потоком электронов, прошедших сквозь объект (рис. 1.4, рис. 1.5, а) [5, 7].

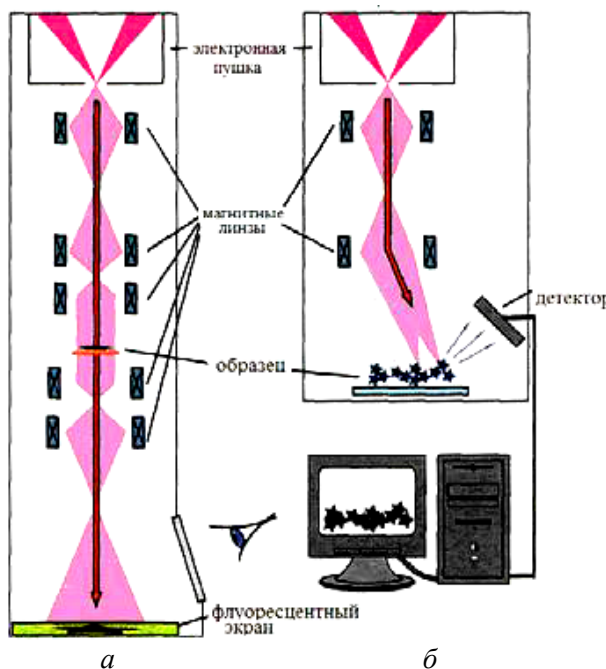


Рис. 1.5. Принцип работы электронного просвечивающего и сканирующего микроскопов:

а – просвечивающий микроскоп; б – сканирующий микроскоп

Электронный просвечивающий микроскоп (рис. 1.5, а) состоит из осветительной системы, формирующей поток ускоренных электронов (электронной пушки), оптической системы (блока электромаг-

нитных линз, предназначенных для изменения траектории движения и фокусировки электронов), системы фоторегистрации изображения (флуоресцирующего экрана и фотомагазина с фотопластинками; в современных моделях микроскопов для регистрации изображения используют цифровые фото- и кинокамеры), системы электропитания и вакуумной системы (вакуум, т. е. остаточное давление газов в колонне микроскопа составляет 10^{-3} – 10^{-5} Па, что необходимо для беспрепятственного перемещения электронов). Толщина объектов, которые можно «просветить» электронным пучком, определяется параметрами режима работы микроскопа (в частности, ускоряющим напряжением, создаваемым между анодом и катодом электронной пушки, генерирующей поток ускоренных электронов) и составляет от 10 А^0 до 10 мкм. Это требует специального приготовления изучаемых объектов (утонения, приготовления реплик), что является достаточно трудоемкой и длительной операцией.

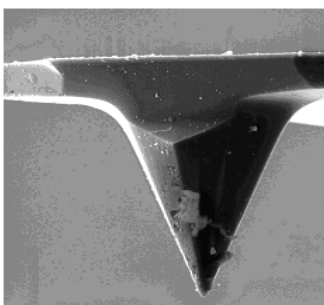
На регистрации достаточно большой гаммы сигналов, представленных на рис. 1.4, основана **сканирующая (растровая) электронная микроскопия (СЭМ или РЭМ, в англоязычной литературе – SEM)**, основными достоинствами которой являются высокая информативность, обусловленная возможностью наблюдать изображение на основе сигналов различных детекторов, а также возможность исследования реальных объектов без специального препарирования; незаменимость при анализе грубых поверхностей с развитым микро-рельефом и изломов благодаря большой глубине резкости и получению четких изображений с характерным трехмерным эффектом.

Основную роль в исследовании наномира играют методы сканирующей зондовой микроскопии – **СЗМ (SPM, Scanning Probe Microscopy)**, создание которых послужило важнейшим стимулом для развития нанотехнологий.

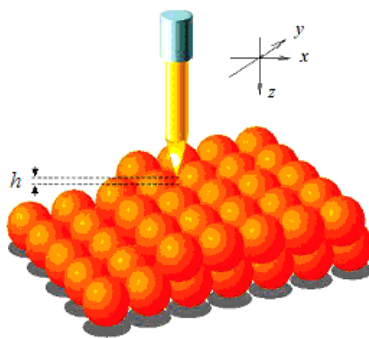
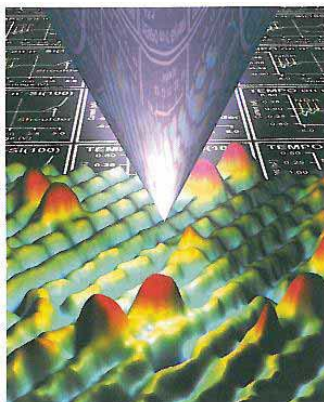
С момента изобретения немецкими физиками Г. Биннингом и Г. Рорером первого варианта сканирующего туннельного зондового микроскопа в 1981 г. прошло всего около 40 лет, но за это время остроумной игрушки он превратился в один из мощнейших инструментов нанотехнологии. Сейчас известны десятки различных вариантов зондовой сканирующей микроскопии: туннельный микроскоп, атомно-силовой микроскоп, магнитно-силовой микроскоп, электростатический силовой микроскоп, сканирующий фрикционный микроскоп, оптический сканирующий микроскоп ближнего поля и т. д.

Общим у методов зондовой сканирующей микроскопии является наличие зонда – чаще всего, заостренной иглы (алмазной, металлической, кремниевой, на основе углеродных нанотрубок) с радиусом при вершине ~ 10 нм и сканирующего механизма – механического манипулятора (3D-пьезосканера, изготовленного из пьезокерамического материала), способного перемещать зонд над поверхностью образца (образец под зондом) в трех измерениях с высокой точностью – по нормали к поверхности образца до тысячных долей нанометра, в плоскости образца – на уровне сотых долей нанометра (рис. 1.6).

В основе работы зондовых микроскопов лежат различные виды взаимодействия зонда с поверхностью.



a



б

Рис. 1.6. Зонд СЗМ и его позиционирование по отношению к исследуемой поверхности:

a – внешний вид; *б* – позиционирование зонда

Выходной сигнал от зонда обрабатывается с помощью компьютера и преобразуется в трехмерное изображение. Для обработки снимаемых сигналов, их фильтрации и корректировки используют специальные пакеты программ.

Работа **сканирующего туннельного микроскопа (СТМ, STM)** основана на регистрации чрезвычайно малых туннельных токов ($I_t \sim 1\text{--}10\text{ нА}$), обусловленных квантовыми эффектами и возникающими между металлическим зондом и образцом, находящимися на расстоянии $10\text{ \AA}$ при приложении между ними небольшого напряжения $U = 0,01\text{--}10\text{ В}$ (рис. 1.7). Возникновение туннельных токов обусловлено квантовым эффектом перехода частиц (электронов) через область, запрещенную классической механикой (потенциальный барьер) – туннелированием. В СТМ данной областью является зазор между острием иглы и ближайшей точкой поверхности образца.

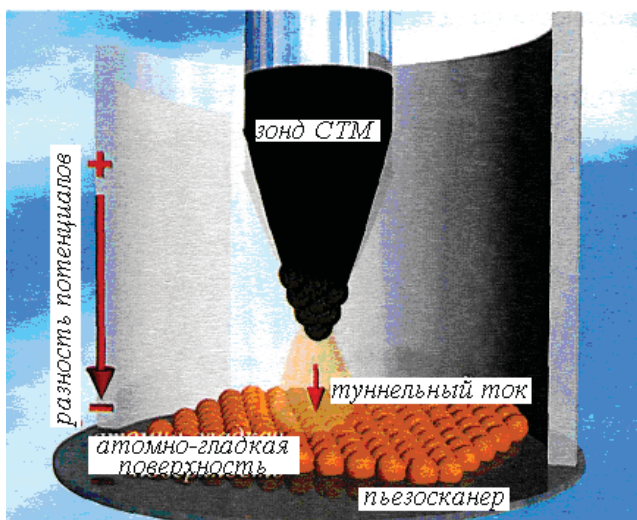


Рис. 1.7. Общая схема сканирующей туннельной микроскопии

Атомно-силовая микроскопия (АСМ, AFM) основана на изменении сил притяжения и отталкивания, которые возникают при приближении острия зонда к поверхности образца на межатомные расстояния и являются результатом взаимодействия электронных орбиталей атомов зонда и образца [7, 11].

Игла-зонд имеет форму конуса или пирамиды и выполняется чаще всего из алмаза; может быть также применена фуллереновая, кремниевая игла, игла из нанотрубок. По мере приближения иглы к поверхности ее атомы все сильнее притягиваются к атомам образца. Силы притяжения будут возрастать до тех пор, пока игла и поверхность не сблизятся настолько, что их электронные облака начнут отталкиваться электростатически. При дальнейшем сближении электростатическое отталкивание экспоненциально ослабляет силу притяжения. Эти силы уравниваются на расстоянии между атомами около 2 нм (рис. 1.8, *а*).

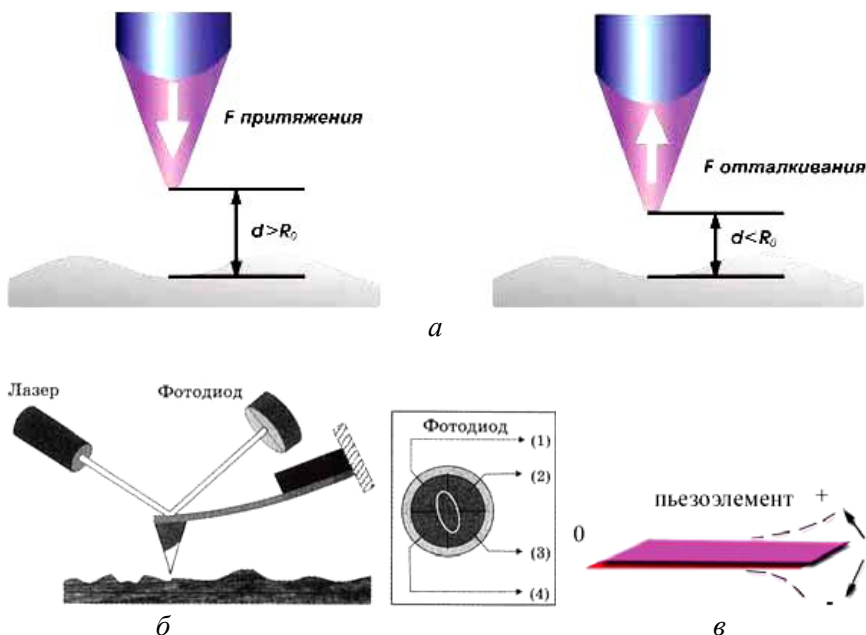


Рис. 1.8. Атомно-силовая микроскопия:
а – принцип взаимодействия зонда и поверхности в АСМ;
б – схема работы АСМ; *в* – изгиб кантилевера)

В современных конструкциях АСМ возможна регистрация сил взаимодействия между зондом и поверхностью (дальнодействующих сил Ван-дер-Ваальса) при их удалении на десятки и сотни ангстрем. Для измерения величины силового взаимодействия исполь-

зуется схема (рис. 1.8, б, в), включающая в качестве миниатюрного динамометра упругую консоль – кронштейн (или кантилевер – от англ. *cantilever*).

Ультратонкие (толщиной в 60 нм) монокристаллические кантилеверы, полученные в фирме IBM, способны регистрировать силы величиной даже в 10–18 Н. АСМ позволяет получать изображение поверхности с точностью до ангстрема, что даже выше точности СТМ, поскольку в АСМ нет ограничений на близость расположения зонда к исследуемой поверхности.

Важным достоинством приборов СЗМ является то, что с их помощью возможно не только получение трехмерной картины объекта на атомном уровне без разрушений и почти без искажений, но и осуществление манипуляций с атомами, их захват и перемещение в новые позиции, т. е. осуществление модификации поверхностей в нанометровых областях, сверхточной обработки и использование их в качестве вполне реальных инструментов для создания наноструктур с заранее заданными свойствами из отдельных атомов (атомной сборки). Не случайно СЗМ называют «глазами и пальцами» нанотехнологий.

Таким образом, зондовые методы позволяют воплотить новую технологическую парадигму «снизу-вверх» и реализовать технологический цикл исследование – создание – контроль структуры на наноуровне.

Для конструирования структур необходимые атомы осаждают на подложку, например, из газовой фазы, а затем с помощью игольчатого электрода производится атомная сборка по заранее намеченной программе. Использование СЗМ для локального переноса атомов является, по-видимому, единственным путем получения предельной миниатюризации при создании наноустройств.

С помощью зондовой микроскопии можно получать устройства памяти, записывающие и воспринимающие информацию в виде элементов нанометровых размеров. Уникальные возможности СЗМ могут быть использованы также при сборке самовоспроизводимых биологических объектов. На основе совершенствования зондов, в частности, для АСМ проводятся также многочисленные разработки по созданию миниатюрных сенсоров – механических, химических, тепловых, оптических и т. д.

Таким образом, основными требованиями к методам и средствам практической диагностики наноматериалов являются: высокое (атомное) разрешение; взаимодополнение; комплексная информация об основных физических, физико-химических и геометрических параметрах наноструктур и протекающих в них процессах; возможность регистрации электронных, оптических, магнитных, механических и иных свойств нанообъектов на наноскопическом уровне; неразрушающий характер; диагностика структур *in situ*.

1.5. Атомно-молекулярная сборка (механосинтез)

Для перехода от микро- к нанотехнологиям производства материалов и изделий на их основе (т. е. создания макроскопических продуктов на основе генеративной сборки на уровне атомов и молекул), недостаточно только уменьшения размеров элементов, необходимо достижение прецизионности в изготовлении, т. е. создание методик манипуляции элементарными объектами нанотехнологий с целью получения изделий с наперед заданными функциональными свойствами (рис. 1.9, а).

Уникальное решение проблемы манипулирования индивидуальными атомами и молекулами для производства наращиванием продуктов с заданной атомарной структурой предложил американский футуролог Э. Дрекслер (1986 г.). Согласно его идее, для осуществления атомно-молекулярной сборки необходим робот-сборщик (ассемблер, от англ. assemble – собирать). Ассемблер – это молекулярная машина, которая может быть запрограммирована строить практически любую молекулярную структуру или устройство из более простых химических строительных блоков, т. е. поатомной сборкой (рис. 1.9, б–г) [7, 9].

Главная задача ассемблера – соединение атомов и молекул в определенном порядке. Он должен уметь строить наносистемы любого назначения – двигатели, станки, вычислительные устройства, средства связи и т. д., вплоть до самокопирования.

Ассемблер включает в себя нанокomпьютер, комплекс наноманипуляторов и наносенсоров. Однако несмотря на гениальную идею, сегодня промышленных наномашин-ассемблеров, способных создавать реальные функциональные материалы, не существует.

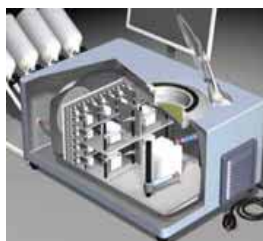
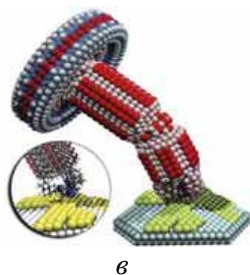
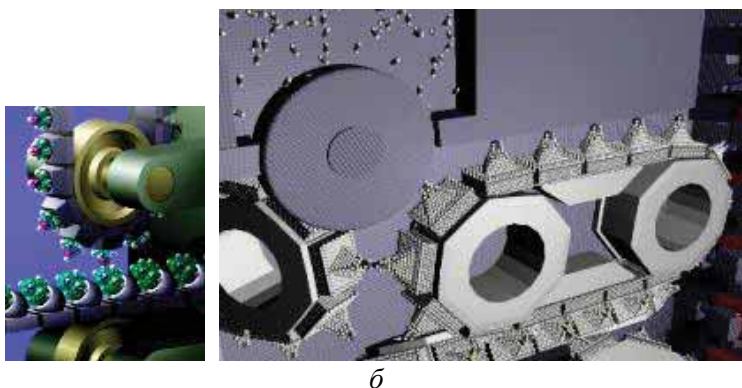
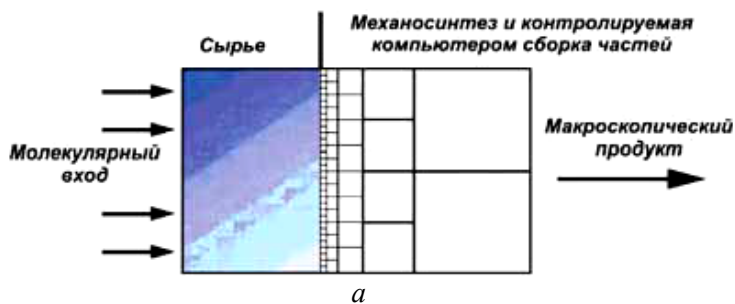


Рис. 1.9. Атомно-молекулярная сборка изделий с помощью ассемблера:
a – схема процесса генеративной сборки продукции на наноуровне;
б – предполагаемая производственная линия наносборки;
в – наноманипулятор; *г* – возможный вид нанофабрики

Одной из причин невозможности реализации этой идеи является наличие интерфейса «человек-компьютер-манипулятор», поэтому сама процедура сборки не может быть автоматизирована на нано-

уровне. Возможно, в будущем будет получена система «наноконпьютер-наноманипулятор», и процесс сборки может быть осуществлен без участия человека (эксперты прогнозируют это во второй половине XXI в.).

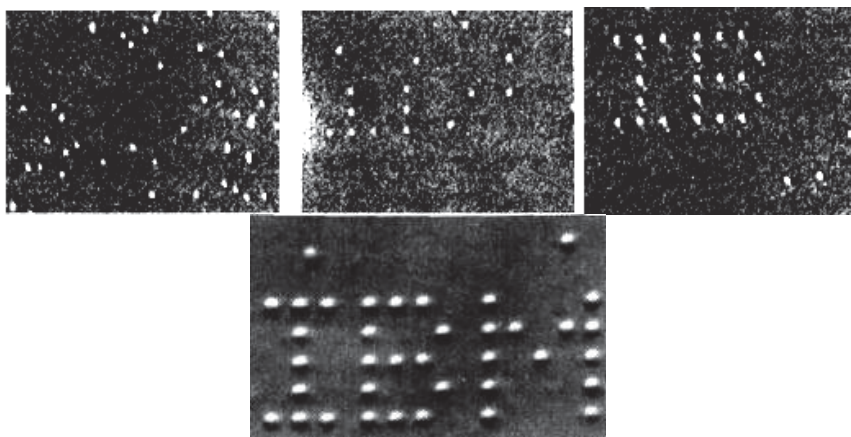
В настоящее время процесс конструирования наращиванием структур за счет манипуляции отдельными атомами возможен при помощи сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ) – основного инструмента исследования наноразмерных структур.

Важным достоинством данных микроскопов является то, что с их помощью возможно не только получение трехмерной картины объекта на атомарном уровне без разрушений и почти без искажений, исследование топографии поверхности, состава, магнитных и электрических свойств, твердости наноструктурированных объектов, но и совершение манипуляции с атомами, их перемещение и комбинирование, а значит, осуществление модификации поверхности в нанометровых областях, реализация сверхточной «сборки» и использование их в качестве вполне реальных инструментов для создания наращиванием наноструктур из отдельных атомов.

Изготовление наноструктур и наноприборов с помощью СЗМ называют механическим синтезом (механосинтезом). В данном случае нанообъектами – отдельными атомами или отдельными молекулами – можно манипулировать с помощью зонда, который обеспечивает захват отдельных атомов и перенос их в новую позицию, т. е. реализует атомарную сборку.

Таким образом, СЗМ позволяют конструировать требуемые наноструктуры поатомно, шаг за шагом прибавляя необходимые атомы, «выращивая» объект. Данная методика получила название атомного переключения («*atomic switch*»).

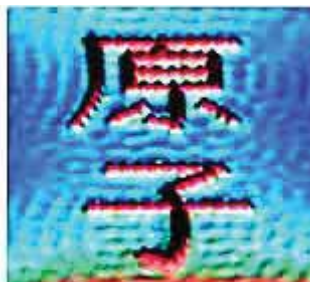
Вначале необходимые атомы осаждают на подложку, а затем с помощью игольчатого электрода производится атомная сборка наращиванием по заранее намеченной программе. Кстати, надпись «*IBM*» из 35-ти атомов инертного газа ксенона Хе на поверхности монокристалла никеля, занявшая 22 часа, ставшая своеобразным рекордом в методах миниатюризации записи «текста» и первой практической демонстрацией возможности атомной сборки материала в 1989 г. (рис. 1.10), была выполнена именно данным методом.



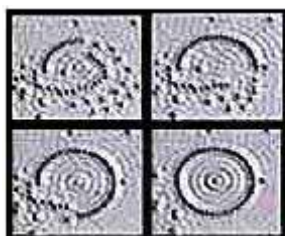
a



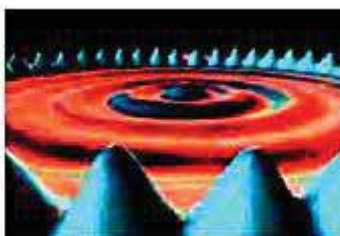
б



в



г



д

Рис. 1.10. Первая демонстрация атомной сборки (*a*) и «нанодизайн» сегодня (*б, в, г, д*):
б – «пляшущий человечек», выложенный молекулами монооксида углерода;
в – иероглифы, выложенные атомами железа на поверхности меди; *г* – поатомная
сборка «квантового загона» для электрона из 48 атомов железа на поверхности
кремния; *д* – в собранном «загоне» видны стоячие волны электронной
плотности захваченного ловушкой электрона – «квантовая яма»

Рассмотрим процесс механосинтеза с помощью сканирующего туннельного микроскопа (СТМ) подробнее.

Для реализации атомной сборки с помощью СТМ осуществляют переход работы микроскопа из *режима считывания изображения* (низкие значения туннельного тока и разности потенциалов, достаточно большое расстояние от вершины острого зонда до поверхности) в *режим взаимодействия* (манипуляции), который сопровождается уменьшением расстояния между зондом и атомом, выбранным для перемещения (рис. 1.11).

Допустим, что на поверхности материала имеется адсорбированный атом (под адсорбцией понимают поглощение вещества из газовой или жидкой среды поверхностным слоем твердого тела или жидкости), удерживаемый в определенной позиции теми или иными связями, например, электростатическими, Ван-дер-Ваальсовыми, с атомами подложки (рис. 1.11, а).

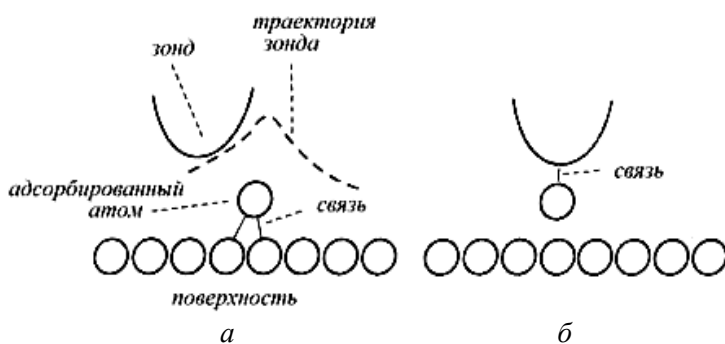


Рис. 1.11. Иллюстрация траектории острого зонда СТМ над адсорбированным на поверхности материала атомом:

- а – режим изображения (острие зонда не контактирует с поверхностью, но располагается достаточно близко для получения изображения);
- б – режим манипуляции (острие зонда расположено так близко к поверхности, что между ним и адсорбированным атомом возникают силы связи)

Когда в процессе сканирования зонд подходит к этому атому, его траектория искажается (рис. 1.11, а), что и служит источником информации о рельефе поверхности. На определенном расстоянии между острием и адсорбированным атомом силы взаимодействия между ними начинают превышать силы, связывающие атом с поверхностью, так что острие тянет атом за собой (рис. 1.11, б).

Захваченный атом можно оставить в любой точке поверхности путем увеличения расстояния между острием и подложкой. Процессы захвата и сброса атома с зонда можно сделать более надежным путем изменения приложенного к нему напряжения. Адсорбированные на поверхности материала атомы можно таким способом перегруппировать и поатомно строить на поверхности различные наноструктуры.

1.6. Самоорганизация и самосборка

В настоящее время идет интенсивный поиск новых принципов, технологий и методик, позволяющих создавать трехмерно упорядоченные структуры из нанообъектов на промышленном уровне [9].

Достаточно перспективными и реальными для практического применения являются технологии создания нанообъектов по принципу наращивания «снизу-вверх», основанные на явлении самосборки и принципе самоорганизации.

*Под **самосборкой** (self-assembly) понимают способность атомов и молекул при определенных условиях самопроизвольно соединяться в наперед заданные молекулярные образования.*

***Принцип самоорганизации** предполагает коллективное взаимодействие атомов с созданием сложных упорядоченных структур на более высоком иерархическом уровне организации, чем тот, который наблюдался в исходной системе (создание сложных упорядоченных структур из более простых). Самоорганизация включает взаимодействие и интеграцию, обуславливающие коллективное поведение.*

Самосборка, основанная на принципе самоорганизации, является идеальным вариантом создания материалов на атомно-молекулярном уровне, в том числе формирования поверхности с заданными свойствами.

Процесс самосборки структур на наноуровне основан на стремлении физической системы к термодинамическому равновесию, т. е. движущей силой процесса в данном случае является минимизация свободной энергии в системе наночастиц. Минимум энергии достигается при формировании объектов, подобных кристаллам, с той разницей, что роль атомов или молекулярных групп в таких образованиях играют наночастицы. Безусловно, отмеченная «самопроиз-

вольность» инициируется технологом за счет определенного воздействия на систему.

Самосборка достаточно широко распространена в природе (рост кораллов, ракушек, зубной эмали, формирование снежинок, опалов). Структура всех тканей определяется их самосборкой из клеток, структура самих клеток определяется самосборкой из отдельных молекул и т. д. [3, 5].

Примером самоорганизующихся систем могут быть также шестиугольные пчелиные соты, коллективное поведение муравьев.

Механизм самосборки и самоорганизации наносистем в природе подтолкнул исследователей к попытке скопировать его принципы для построения искусственных наноструктур.

Интерес к процессам самосборки и самоорганизации частиц обусловлен, прежде всего, тем, что если сами по себе наночастицы представляют главным образом академический интерес, то их ансамбли – это потенциальные рабочие элементы определенных устройств. При этом открывается возможность создания принципиально нового поколения наноустройств, многоуровневая архитектура которых базируется именно на присущем наночастицам свойстве самопроизвольно объединяться в упорядоченные ансамбли.

Строительными элементами при самосборке являются уже не отдельные атомы («нанокирпичики»), а компоновочные элементарные блоки – наноблоки (нанокластеры), состоящие из группы связанных атомов или молекул с размерами до 100 нм. Это весьма важный момент, т. к. построение вещества на уровне атомной сборки, как уже указывалось, весьма неэффективно и требует достаточно длительного времени.

При этом *главной целью самосборки является создание из наноразмерных элементов макро- и мезоскопических структур*. Предполагается, что именно наносборка станет предпочтительным методом создания больших наноструктурных массивов, таких как компьютерные запоминающие устройства и логические схемы [7, 8, 11].

При самосборке наноконструктор вводит определенные наноблоки на поверхность или на ранее собранную наноструктуру. Затем молекулы выравнивают себя в определенных положениях, иногда формируя слабые связи, например, водородные или Ван-дер-Ваальсовы, а иногда – сильные ковалентные связи, минимизируя общую энергию.

В зависимости от характера взаимодействия между частицами (электростатические, капиллярные, Ван-дер-Ваальсовы силы, биоспецифическое распознавание) и поставленной цели используют разные методы конструирования упорядоченных структур из наночастиц. При этом создают как двумерные, так и трехмерные ансамбли частиц, пористые структуры, агрегаты частиц специфической формы, композиционные материалы.

Подобно атомам в кристаллах, наночастицы (кластеры, «супер-атомы») также способны спонтанно собираться в упорядоченные агрегаты и формировать упорядоченные массивы.

Чем однороднее исходные наночастицы, тем «правильнее» их упаковка в массиве. Теория и эксперимент в этой области показывают, что структурно-упорядоченные материалы обладают характеристиками, существенно более высокими, чем аналогичные композиции с хаотичным расположением частиц. Кроме того, структурный порядок наночастиц в ряде случаев инициирует появление качественно новых свойств материала.

Именно на основе упорядоченных наноструктур возможно создание оптоэлектронных устройств, фотонных материалов, биосенсоров, носителей памяти нового поколения, ферромагнитных материалов и т. д.

Явления образования упорядоченных структур и самоорганизации происходят обычно как отклик сложной системы на сильное внешнее воздействие. Для создания особых условий, при которых в конкретной системе происходит самосборка, могут быть использованы гравитационное, электрическое или магнитное поле, капиллярные силы, игра на смачиваемости-несмачиваемости компонентов системы и другие приемы [5, 11] (рис. 1.12).

Создавать «самоорганизующиеся» структуры можно не только с использованием однородных, но и разнородных наночастиц с определенным соотношением их размеров. Синтезированы двух- и трехмерные организованные массивы нанокристаллов Pt, Pd, Ag, Au, Fe, Co, сложные организованные структуры, подобные атомным решеткам кристаллических соединений (рис. 1.13) [3, 5, 8, 11].

Самосборка представляет собой основу принципиально новой перспективной технологии будущего – молекулярной электроники – направления, целью которого является создание электронных устройств, компьютеров, дисплеев на основе отдельных молекул.

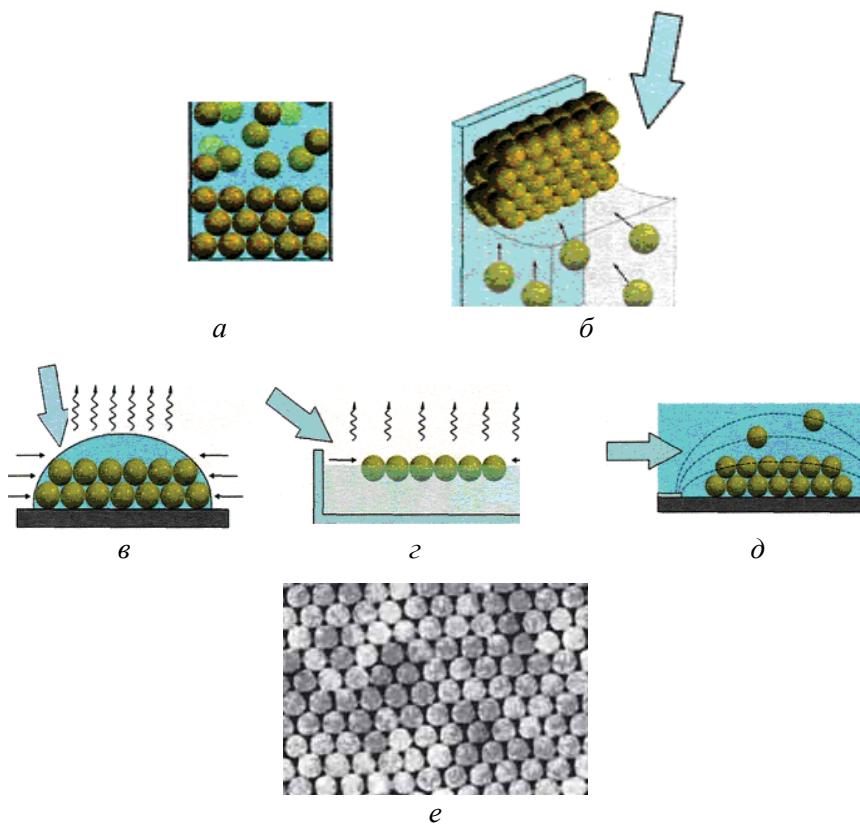


Рис. 1.12. Самосборка:

a – под действием гравитационного поля; *б* – капиллярных сил;
в, г – сил поверхностного натяжения; *д* – электрического поля;
е – упорядоченная структура, полученная самосборкой

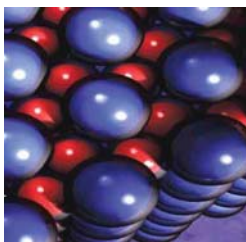


Рис. 1.13. Трехмерная наноструктура, сформированная
 в результате самосборки кластеров разного состава

Самособирающиеся структуры можно использовать также для формирования поверхностных слоев и материалов с требуемыми функциональными свойствами, например, с высокой коррозионной стойкостью, с высокими гидрофильными (хорошей смачиваемостью) или гидрофобными (плохой смачиваемостью) свойствами; с высокой износостойкостью, твердостью, с требуемыми электрическими и магнитными свойствами, с высокими каталитическими свойствами и т. д. [8, 11]. Некоторые примеры «самособранных» структур, имеющих прикладной характер, приведены на рис. 1.14.

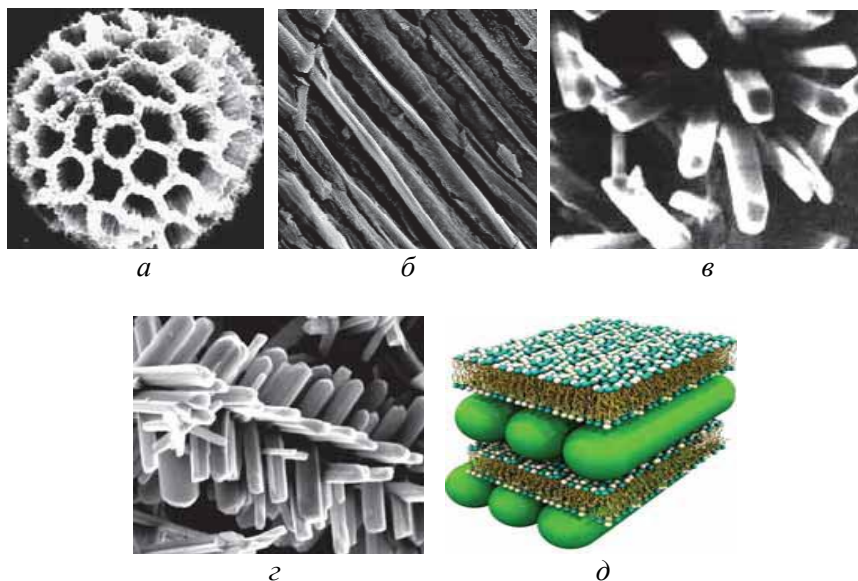


Рис. 1.14. Примеры структур, полученных самоорганизацией и самосборкой:
а – керамический носитель катализатора для различных химических процессов;
б – керамика с полыми каналами, которая может быть использована как компонент композита, как носитель катализатора, а так же как капиллярная среда для теплообменников; *в* – нитевидные кристаллы для создания высокопрочных композитов; *г* – массив самоупорядоченных «ветвистых» нанокристаллов двух полупроводников с разным типом проводимости для создания термоэлектрических элементов; *д* – слоистая биологическая структура, полученная на основе принципов самоорганизации и самосборки, для применения в биосенсорах и для точной доставки лекарственных препаратов

1.7. Структурные особенности наноматериалов

Существенные изменения свойств наноматериалов по сравнению с традиционными аналогами связаны, в первую очередь, с особенностями их структурного состояния.

При переходе от макрообъемов к нанообъектам происходит *изменение соотношения поверхностных и объемных атомов материала*. Для наночастиц доля атомов, находящихся в тонком поверхностном слое (его толщину принимают, как правило, равной 1 нм, что соответствует 2–3 атомным слоям для большинства металлов), по сравнению с мезо- и микрочастицами заметно возрастает.

До определенного размера частиц доля поверхностных атомов мала их вкладом можно пренебречь. У наночастиц свойства поверхностных атомов становятся определяющими.

Доля приповерхностных атомов a пропорциональна отношению поверхности S частицы к ее объему V : $a \sim S / V$. Если обозначить характерный размер частицы как R и принять, что частицы имеют сферическую форму, то по мере уменьшения их размера все большая доля атомов оказывается на свободных поверхностях: $a \sim S / V \sim R^2 / R^3 \sim 1 / R$.

Получаем следующие соотношения между диаметром зерна (частицы) и объемной долей поверхностного слоя:

- диаметр зерна (частицы), нм – 100, 50, 25, 20, 10, 6, 4;
- объемная доля поверхностного слоя, % – 6, 12, 24, 30, 60, 100, 150.

Таким образом, в нанокристаллических материалах, начиная с диаметра зерна 6 нм, объем поверхностного слоя становится больше объемной доли кристаллов.

Поверхностные атомы обладают свойствами, отличными от объемных, поскольку они связаны с «соседями» по-иному, нежели в объеме (изменяется координационное число, симметрия локального окружения и т. д.). У поверхностных атомов, в отличие от находящихся в объеме твердого тела, задействованы не все связи с соседними атомами. Для атомов находящихся на выступах и уступах поверхности, ненасыщенность связей еще выше. В результате в приповерхностном слое может произойти атомная реконструкция и возникновение другого порядка расположения атомов, что приводит к искажениям кристаллической решетки и даже к изменению ее типа [7, 8, 11].

Если количество вещества на поверхности и в объеме становится соизмеримым, то роль поверхности как более активной составляющей существенно возрастает. Для наноматериалов весь материал «работает» как приповерхностный слой.

В обобщенном виде основные структурные и физические аспекты специфики наноматериалов, определяющие аномалию их характеристик, приведены на рис. 1.15.

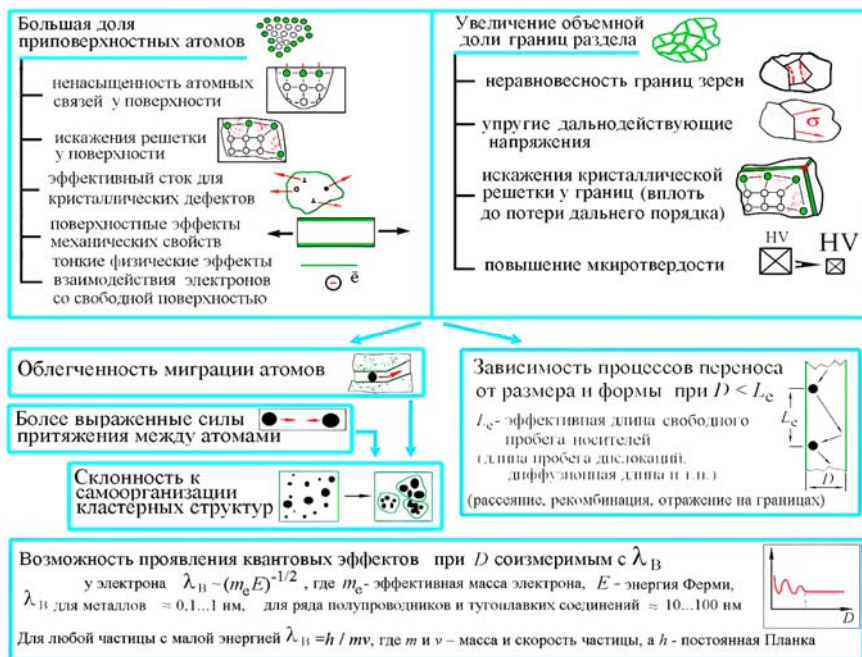


Рис. 1.15. Структурные и физические причины специфики наноматериалов по сравнению с традиционными аналогами

При различных схемах испытаний наноструктурные материалы (в частности, металлы Fe, Cu, Ti, Ni, Ag, Pd и др.) демонстрируют значительно более высокие по сравнению с традиционными аналогами значения многих характеристик механических свойств – предела текучести, временного сопротивления, твердости, ударной вязкости, усталостной прочности и т. д.

Высокие механические характеристики механических свойств наноструктурных материалов обусловлены, прежде всего, малыми

размерами их зерен и большой объемной долей, занимаемой границами зерен. Последнее вносит существенный (иногда определяющий) вклад в пластическую деформацию. Высокие прочность и твердость нанокристаллических материалов также обусловлены особенностями влияния ансамблей границ зерен на процессы разрушения при механической нагрузке.

Например, трещины в механически нагружаемых нанокристаллических материалах обычно формируются на границах зерен, нанокристаллические размеры которых приводят к очень высоким значениям критического напряжения для их образования.

Одним из важнейших механических свойств материалов, как известно, является прочность, которая определяется химическим составом и реальной атомарной структурой, т. е. наличием определенной кристаллической решетки (или ее отсутствием) и всем спектром ее несовершенств. Высоких прочностных показателей можно добиться двумя прямо противоположными способами: снижая концентрацию дефектов структуры (в пределе приближаясь к идеальному монокристаллическому состоянию) или, наоборот, увеличивая ее вплоть до создания мелкодисперсного нанокристаллического или аморфного состояния (рис. 1.16) [7, 9].



Рис. 1.16. Схематическая зависимость прочности от плотности атомарных дефектов в материале

Один из основных механизмов упрочнения в этом случае обусловлен эффектом скопления дислокаций вблизи препятствий, которыми при уменьшении размеров зерен являются их границы. Оба пути широко используют в современном физическом материаловедении, и в обоих направлениях существовавшие до недавних пор пределы преодолены на основе использования наноматериалов (рис. 1.16).

Уникальной особенностью наноматериалов является то, что *присущая им высокая прочность дополняется зачастую и высокой пластичностью или даже сверхпластичностью* (рис. 1.17), т. е. достигается оптимальное сочетание свойств прочность-пластичность.

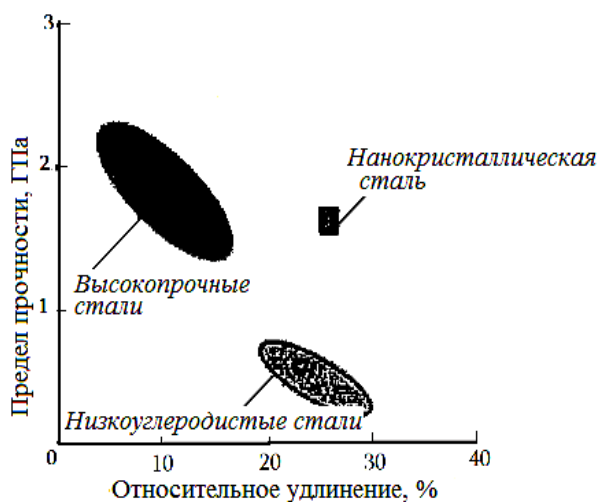


Рис. 1.17. Соотношение между прочностью и пластичностью для сталей

Это обстоятельство весьма важно, поскольку в традиционных материалах увеличение прочности ведет к снижению пластичности. Наилучшим соотношением этих свойств обладают металлические материалы, прежде всего, стали. Уменьшение структурных элементов (размеров зерен) ниже критических размеров приводит к проявлению специфических недислокационных механизмов пластической деформации, т. к. благодаря малому размеру зерен вероятность появления подвижных дислокаций в зерне чрезвычайно мала. *«Включается» особый механизм деформации в виде зернограничного некри-*

сталлографического скольжения, уже при низких температурах конкурирующий с действием стандартного кристаллографического внутризеренного дислокационного скольжения и двойникования.

Многие наноструктурные материалы проявляют высокотемпературную сверхпластичность в результате зернограничного проскальзывания при более высоких скоростях деформации и меньших температурах, чем обычные поликристаллические сплавы тех же составов в режиме сверхпластичности. Наряду с увеличением механических характеристик наблюдается также рост многих показателей эксплуатационных свойств наноматериалов.

Так, на рис. 1.18 показано повышение износостойкости нанокристаллических материалов по сравнению с традиционными аналогами на примере алюминиевых сплавов. Нанокристаллические материалы имеют высокие демпфирующие свойства, что важно для уменьшения вредных воздействий циклических нагрузок, которым подвергаются различные конструкции, для уменьшения шумов, связанных с вибрацией механизмов, повышения точности измерений и т. д.

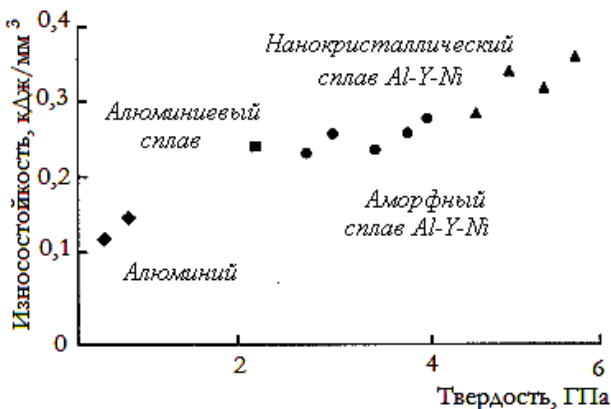


Рис. 1.18. Повышение износостойкости алюминиевых сплавов при переходе к нанокристаллическому состоянию

1.8. Углеродные наноструктуры [4, 7]

Особая роль среди различных групп наноматериалов принадлежит углеродным многоатомным кластерным образованиям – фуллеренам, нанотрубкам.

Интерес к данным структурам обусловлен рядом причин.

Углерод – уникальный химический элемент, составляющий основу живой природы; отличается способностью соединяться с большинством элементов и образовывать молекулы самого различного состава и строения. По своим уникальным и разнообразным свойствам, зачастую противоположным для разных форм, с углеродом вряд ли сравнится хоть один элемент Периодической системы Менделеева. Это эталон прозрачности и «абсолютно» черное тело; ди- и парамагнетик; диэлектрик и металл; полупроводник и полуметалл; сверхтвердый и сверхмягкий материал; теплоизолятор и один из лучших проводников тепла. Столь уникальные свойства – причина того, что и чистый углерод, и содержащие его материалы служат объектами фундаментальных исследований и применяются в бесчисленных технических процессах.

Открытие в последние годы удивительного многообразия форм углерода (фуллеренов, гиперфуллеренов, нанотрубок, графенов и т. д.) заставляет по-новому взглянуть, а в ряде случаев и пересмотреть представления о фундаментальных процессах, происходящих с участием углерода в живой и неживой природе.

На основе углерода возможно создание биополимеров, синтетических полимеров, разнообразных пластмасс.

Углеродные наноструктуры особенно ярко демонстрируют различные наноэффекты, проявляют целый ряд весьма необычных свойств.

Фуллерены и нанотрубки представляют собой элементарные объекты нанотехнологий, на основе которых возможно создание целого ряда имеющих практическое значение макрообъектов – материалов и устройств.

Потенциал использования данных структур (особенно, нанотрубок) превосходит потенциал других наноструктур.

Достаточно долгое время были известны три основные аллотропные модификации углерода – графит, алмаз и сажа (аморфный углерод) (рис. 1.19). Однако с середины прошлого века углеродное семейство стало быстро пополняться. Сначала были открыты одномерный вариант углерода карбин и гексагональная разновидность алмаза лонсдейлит. Далее (1985 г.) были обнаружены молекулы фуллеренов C₆₀ (рис. 1.19) и их производные C_n. Менее чем через 10 лет мир узнал о существовании цилиндрической модификации углерода – одномерных однослойных и многослойных углеродных нанотруб-

ках. И, наконец, в 2004 г. группой ученых из Англии и России была получена двумерная форма углерода – графен (рис. 1.19).

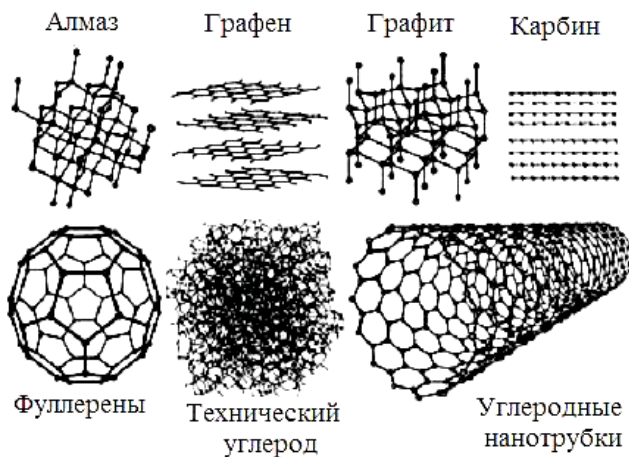


Рис. 1.19. Аллотропные модификации углерода

Фуллерены как новая аллотропная форма существования углерода в природе в твердом состоянии (наряду с давно известными алмазом и графитом) были обнаружены сначала в космосе астрофизиками при изучении межзвездной пыли, а затем получены в 1985 г. при исследовании масс-спектров паров графита после лазерного облучения твердого образца.

Фуллерены представляют собой сферические и сфероидальные полые внутри кластеры – многоатомные молекулы углерода C_n , замкнутая поверхность которых образована правильными многогранниками из атомов углерода. Название данных энергетически нейтральных частиц связано с фамилией американского архитектора-авангардиста Бакминстера Фуллера (вначале их называли бакминстерфуллеренами), применившего плоские строительные элементы в форме многоугольников при строительстве куполов зданий, получившего патент на строительные конструкции в виде фрагментов многогранных поверхностей.

Молекула C_{60} содержит фрагменты с пятикратной симметрией, несвойственной неорганическим соединениям в природе. Поэтому признано, что молекула **фуллерена** является органической молеку-

лой, а кристалл, образованный такими молекулами (**фуллерит**), – это молекулярный кристалл, являющийся связующим звеном между органическим и неорганическим веществом.

Одним из наиболее распространенных, достаточно простых и эффективных методов получения фуллеренов является использование дугового разряда между стержнями из химически чистого (пиролитического) графита в вакууме с подачей инертного газа (гелия) (рис. 1.20). Данный метод, разработанный В. Кретчмером и Д. Хаффманом в 1990 г., получил название «фуллереновая дуга». При пропускании тока (I 100 А, U 25–35 В) в месте контакта электродов (диаметром 5–20 мм) возникает электрическая дуга (температура 4 000 К), в которой испаряется графит (анод).

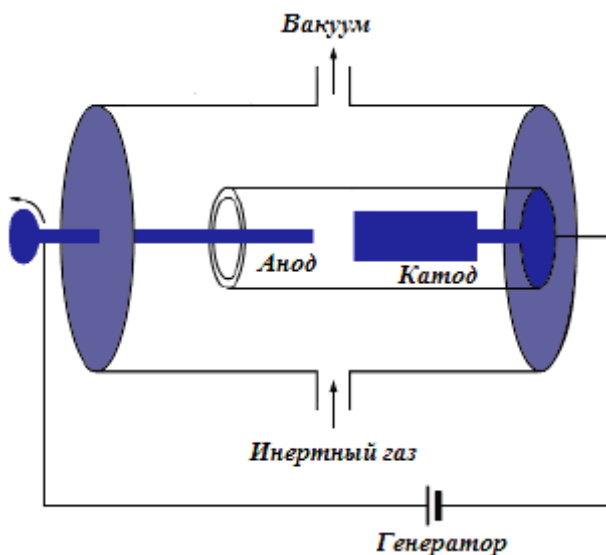


Рис. 1.20. Схема установки для получения фуллерена путем термического испарения графита

При умеренном нагревании разрывается связь между отдельными слоями графита, но не происходит разложения испаряемого материала на отдельные атомы. Испаряемый слой состоит из отдельных фрагментов, которые и являются основой для построения молекулы C_{60} и других углеродных кластеров. Фуллерены обладают окисли-

тельной способностью, проявляют свойства ароматических соединений, способны вступать в химические реакции разного типа (восстановления, циклоприсоединения, галогенирования, гидрирования, окисления, полимеризации и т. д.). Фуллерен нерастворим в воде, однако, в отличие от алмаза и графита, растворяется в некоторых органических растворителях, что используется при производстве и очистке фуллеренов.

Фуллерены являются «сырьевым» материалом для создания наноструктур («фуллереновых веществ») с разнообразными свойствами – кристаллов, покрытий, полимеров, имеющих большие перспективы для применения в электронике, оптоэлектронике, энергетике, материаловедении, биотехнологии, медицине и других областях. Число вариантов фуллереновых материалов уже сегодня насчитывает более 10 000.

Внедрение атомов разных металлов может существенно изменить электрические свойства фуллеренов и даже превратить фуллерен-изолятор (или полупроводник с очень низкой проводимостью) в проводник, что позволяет использовать фуллереновые молекулы для создания приборов и устройств нанoeлектроники на новых физических принципах. Фуллерен, внутри которого расположены атомы редкоземельных элементов (тербия Tb, гадолиния Gd, диспрозия Dy), обладает свойствами магнитного диполя, ориентацией которого можно управлять внешним магнитным полем. При этом возникает перспектива использования фуллеренов в качестве основы для создания магнитной запоминающей среды со сверхвысокой плотностью информации – до 10^{12} бит/см². Легированные фуллерены проявляют также ферромагнетизм, сегнетоэлектрические свойства.

Вслед за открытием фуллерена наступила очередь других наноразмерных структур на основе углерода. Одним из таких материалов, который имеет уже сегодня достаточно разнообразные области применения и большие перспективы использования в будущем, стали *углеродные нанотрубки (УНТ)*, представляющие собой протяженные структуры в виде полого цилиндра, состоящие из одного или нескольких свернутых в трубку графитовых слоев с гексагональной организацией углеродных атомов (рис. 1.21). УНТ как новая аллотропная форма углерода были открыты японским физиком С. Ииджима в 1991 г.

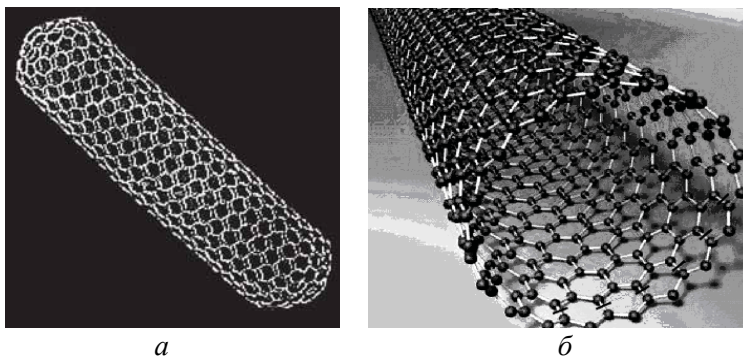


Рис. 1.21. Углеродная нанотрубка:
 а – схематическое изображение углеродной нанотрубки;
 б – расположение атомов на ее поверхности

Диаметр УНТ составляет 1–150 нм, а длина измеряется десятками и сотнями микрометров и постоянно увеличивается по мере усовершенствования технологии их получения. На поверхности трубки атомы углерода расположены в вершинах правильных шестиугольников. Концы трубки закрыты с помощью шести пятиугольников. Фактически нанотрубки можно представить как лист графита, свернутый в бесшовный цилиндр.

Существуют, подобно фуллеренам, и многослойные нанотрубки, которые отличаются от однослойных значительно более широким разнообразием форм и конфигураций как в продольном, так и в поперечном направлении. Структура типа «русской матрешки» (*russian dolls*) представляет собой совокупность коаксиально вложенных друг в друга однослойных нанотрубок.

Благодаря особенностям своего строения (высокой прочности связи, рекордно высокой плотности упаковки атомов, отсутствию или малой плотности дефектов структуры) нанотрубки имеют уникальные физико-химические, механические свойства. Модуль Юнга E углеродных нанотрубок составляет от 0,5 до 2 ТПа (для стали $E = 0,21$ ТПа), что определяет их высокую жесткость. При этом углеродные нанотрубки весьма упруги при изгибе, что обусловлено малой толщиной стенки нанотрубки ($\sim 0,34$ нм), их практически бездефектностью; кроме того, углеродные кольца стенок в виде почти правильных шестиугольников при изгибе меняют свою структуру, но не рвутся.

Графен представляет собой двумерную аллотропную модификацию углерода, образованную слоем атомов углерода толщиной в один атом, находящихся в sp^2 -гибридизации и соединенных посредством σ - и π -связей в гексагональную двумерную кристаллическую решетку (рис. 1.22). Его можно представить как одну плоскость графита, отделенную от объемного кристалла. Данный материал синтезирован в 2004 г. в Манчестерском университете (Великобритания), за его создание ученым А. Гейму и К. Новоселову 2010 г. присуждена Нобелевская премия.

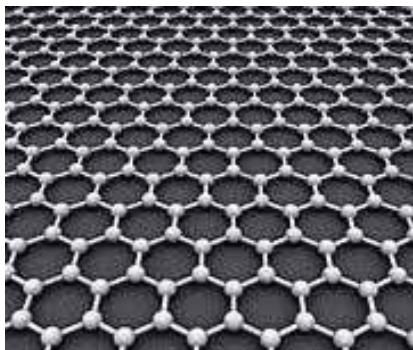


Рис. 1.22. Структура графена (расстояние между атомами 0,142 нм)

Среди замечательных свойств графена – высочайшая механическая прочность (по этому показателю он в 100 раз превосходит сталь аналогичной толщины), высокая теплопроводность (коэффициент теплопроводности в 10 раз выше, чем у меди), максимальная подвижность электронов из всех известных материалов.

1.9. Нанотехнологии в машиностроении

Основными направлениями, в которых может быть достигнут значительный эффект в машиностроении благодаря применению нанотехнологий, являются следующие:

1. Увеличение ресурса режущих и обрабатывающих инструментов на основе применения наноструктурных инструментальных материалов, инструментов с покрытиями.

2. Широкое внедрение нанотехнологических разработок в модернизацию парка высокоточных и прецизионных станков.

3. Создание с использованием нанотехнологий методов измерений и позиционирования, которые обеспечат адаптивное управление режущим инструментом на основе оптических измерений обрабатываемой поверхности детали и обрабатывающей поверхности инструмента непосредственно в ходе технологического процесса.

4. Значительное увеличение ресурса работы и улучшение совокупности технических показателей (расхода топлива, снижения шума и вредных выбросов) автотранспорта за счет применения наноматериалов, более точной обработки и восстановления поверхностей.

5. В электронном и электротехническом машиностроении – расширение возможностей радиолокационных систем на основе наноструктур и волоконно-оптических линий связи с повышенной пропускной способностью с использованием фотоприемников и инжекционных лазеров на структурах квантовыми точками; совершенствование тепловизионных обзорно-прицельных систем на основе использования матричных фотоприемных устройств, изготовленных на базе нанотехнологий и отличающихся высоким температурным разрешением; создание мощных экономичных инжекционных лазеров на основе наноструктур для накачки твердотельных лазеров, используемых в фемтосекундных системах.

6. В энергетическом машиностроении – совершенствование технологии создания топливных и конструкционных элементов, повышение эффективности существующего оборудования и развития альтернативной энергетики.

Например, внедрение нанотехнологий в автомобильную промышленность позволит сделать автомобили:

1) доступными (в автомобилях будущего основной составляющей цены будет являться «бренд»);

2) комфортными (за счет более совершенной работы механических частей, улучшенной шумо- и виброизоляции на основе наноструктурированных материалов, эргономичного салона);

3) эффективными (при повышении средней скорости движения автомобилей, повышении КПД использования энергии, необходимой для перевозки людей и грузов);

4) интеллектуальными (за счет широкого внедрения информационных систем во все узлы и компоненты автомобилей, принятие

автомобилем все больших функций водителя на себя, применения разнообразных МЭМС- и НЭМС-систем, применения водоотталкивающих, самоочищающихся, противоизносных и антифрикционных покрытий);

5) безопасными для человека и окружающей среды (на основе новых, экологически чистых силовых установок, в том числе на топливных элементах, качественно нового уровня пассивной и активной безопасности для обитателей салона и пешеходов, широкого использования в конструкции биodeградируемых материалов, возможность 100 % утилизации устаревших автомобилей).

2. ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА МАТЕРИАЛЫ

Работоспособность и надежность детали обеспечиваются за счет выполнения следующих основных требований: прочности, жесткости и стойкости к различным воздействиям (износу, вибрации, температуре и др.). Выполнение требований прочности при статическом, циклическом и ударном нагружениях должно исключить возможность разрушения, а также возникновения недопустимых остаточных деформаций. Требования жесткости к детали или контактной поверхности сводятся к ограничению возникающих под действием нагрузок деформаций, нарушающих работоспособность изделия, к недоступности потери общей устойчивости для длинных деталей, подвергающихся сжатию, и местной – у тонких элементов. Должна быть обеспечена износостойкость детали, которая существенно влияет на долговечность работы механизма. Достаточно, чтобы для каждой детали выполнялись не все перечисленные выше требования, а лишь те, которые связаны с ее эксплуатацией [12–15].

Детали, испытывающие максимальные напряжения на поверхности (изгиб, контактные напряжения), для повышения сопротивления усталости подвергают поверхностному упрочнению. Существуют следующие методы поверхностного упрочнения: механический, термический, химико-термический, лазерная закалка, ионная имплантация, газотермическое напыление покрытий и др.

Воздействие высокоэнергетических источников на материал покрытия и поверхности, на которой оно формируется, вызывает по мере роста плотности энергии на единицу поверхности и минимизации продолжительности воздействия все возрастающую степень измельченности микроструктуры от микро- к ультрадисперсной, нанофазной и далее к аморфной [16, 17].

Плотность мощности различных высокоэнергетических источников представлена на рис. 2.1.

К высокоэнергетическим источникам, используемым для восстановительно-упрочняющих технологий, можно также отнести индукционный и магнитоэлектрический. Магнитоэлектрический источник близок по характеру и плотности воздействия к искровому разряду.

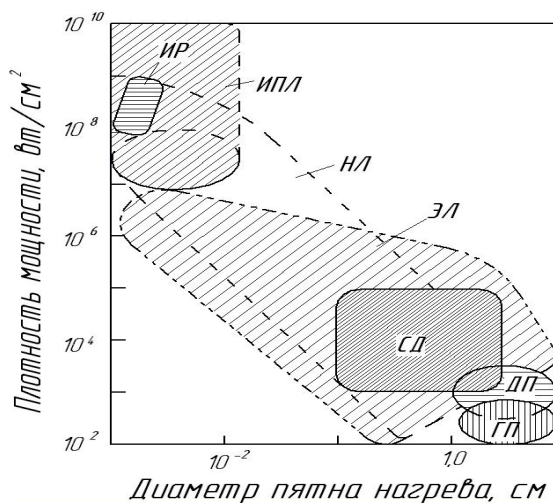


Рис. 2.1. Концентрация энергии различных тепловых источников:

ГП – газовое пламя; ДП – дуговая плазма; СД – сварочная дуга; ЭЛ – электронный луч; НЛ – непрерывные лазеры с плотностью мощности излучения $E_{\max} = 10^8 \div 10^9$ Вт/см²; ИП/Л – импульсно-периодические лазеры ($E_{\max} = 10^{10} \div 10^{14}$ Вт/см²); ИР – искровой разряд

Весь приведенный ряд источников, как показывает мировая практика, может эффективно применяться для формирования различных покрытий, причем аморфизацию могут обеспечивать последние, имеющие максимальную плотность мощности.

2.1. Высокэнергетические импульсные методы пластического формообразования деталей [17–19]

В настоящее время в машиностроении получили распространение безпрессовые высокоскоростные импульсные методы и средства пластического формообразования деталей. В основе этих процессов лежит использование компактных, высокоэффективных энергоносителей, обладающих свойством мгновенного импульсного преобразования энергии в работу пластической деформации.

На этой основе разработаны и широко применяются высокоскоростные процессы с использованием энергии взрывчатых веществ, электрических разрядов, импульсных электромагнитных полей.

Если на гидравлических прессах скорость деформирования составляет менее 1 м/с, на механических прессах ~ 5 м/с, то в процессах импульсного деформирования она может достигать 300–400 м/с.

Выделение в малые промежутки времени (микросекунды) большого количества энергии (сотни килоджоулей) сопровождается созданием высоких удельных давлений (10^8 Па) передающей среды на деформируемую заготовку. Формообразующая оснастка в этих процессах включает или матрицу, или пуансон, а роль ответной части выполняет среда (жидкая, сыпучая, воздушная), передающая энергию силового импульса от источника на заготовку.

При помощи импульсного деформирования листового металла можно выполнять глубокую вытяжку, пробивку, бортовку, формовку, клепку и др.

Различные способы импульсной обработки имеют свою область рационального применения и не предназначены для полной замены традиционных методов ОМД.

Процессы формообразования с использованием импульсных источников энергии классифицируются в зависимости от вида энергоносителя, способа передачи энергии на заготовку, типа конструкции применяемых установок, а также по виду формообразования и исходной заготовки: подводная взрывная штамповка (ПВШ), электрогидроимпульсная штамповка (ЭГШ), магнитно-импульсная обработка металлов (МИОМ). При этом различают следующие способы:

а) высокоскоростные (в качестве источника энергии используются бризантные взрывчатые вещества или импульсные электрические разряды (в жидкостях – ЭГШ, через индуктор – МИОМ), при которых процесс формообразования протекает в течение микросекунд);

б) скоростные (используются пороховые заряды и горючие газовые смеси, процесс протекает в течение миллисекунд).

Штамповка взрывом (рис. 2.2) применяется в основном для изготовления деталей большого габарита, когда применение прессового оборудования и штампов практически невозможно (в виду их громоздкости и дороговизны) или экономически невыгодно.

Электрогидравлическая штамповка (рис. 2.3) чаще всего используется для изготовления сложных деталей среднего габарита из труднодеформируемых металлов. В этих же условиях, но когда нецелесообразно в качестве передающей среды применять воду, используется магнитно-импульсная обработка металлов. Для штамповки деталей

с низкой электропроводностью получила распространение схема МИОМ деформирования с промежуточным подвижным элементом, выполненным из материала с высокой электропроводностью.

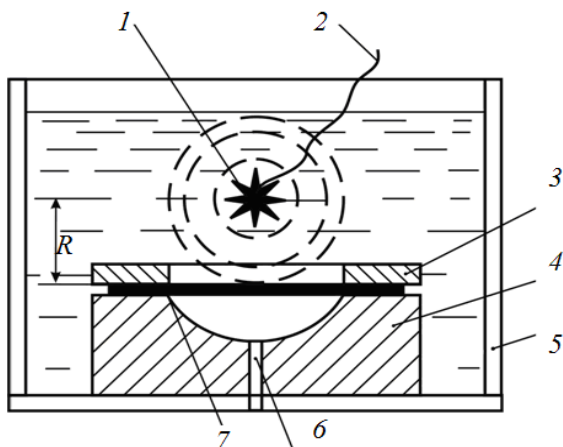


Рис. 2.2. Схема установки для штамповки (вытяжки) взрывом (бассейновый вариант):
1 – заряд взрывчатого вещества; 2 – провод электрического детонатора; 3 – прижим;
4 – матрица; 5 – бассейн; 6 – канал для удаления воздуха; 7 – заготовка

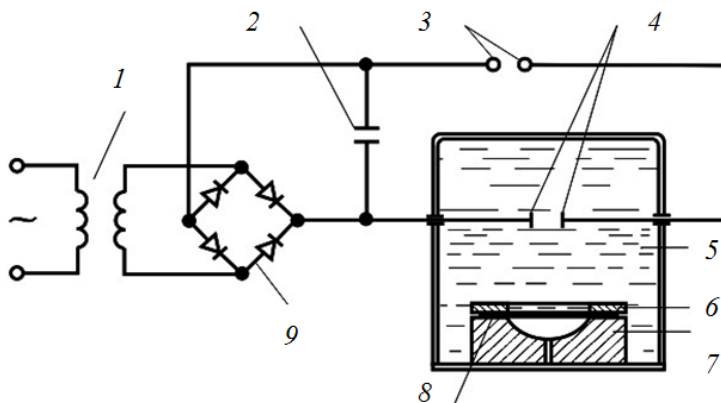


Рис. 2.3. Схемы процессов ЭГШ для преобразования электрической энергии в механическую работу:
1 – трансформатор; 2 – конденсаторы; 3 – разрядник; 4 – зазор между электродами;
5 – резервуар с водой; 6 – прижим; 7 – матрицы; 8 – заготовка; 9 – выпрямитель

Ударная штамповка эффективна при изготовлении небольших партий деталей из листовых и цилиндрических заготовок сравнительно малого габарита.

Высокоэнергетические импульсные методы представляют собой процессы, сопровождающиеся тепловыми эффектами, силовыми воздействиями, появлением инерционных сил, ударных волн и дополнительных динамических напряжений (рис. 2.4). При этом происходит локализация зоны пластической деформации обрабатываемого материала и изменение его физико-механических свойств.

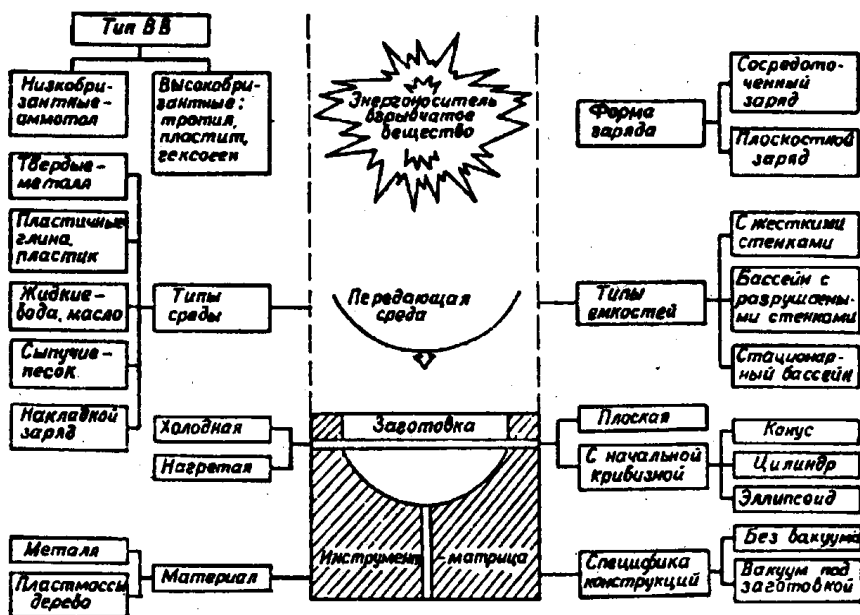


Рис. 2.4. Классификация схем взрывной штамповки

Применение высокоэнергетических импульсных методов обеспечивает возможность использования большого запаса энергии энергоносителя при сравнительно небольшом его объеме, снижение стоимости оснастки, сокращение сроков ее проектирования и изготовления, резкое сокращение капитальных вложений (особенно для штамповки крупногабаритных деталей).

Указанные методы ОМД требуют соблюдения специальных мер по технике безопасности и разработки дополнительных мероприятий по снижению трудоемкости подготовительно-заключительных работ.

Ввиду их перспективности, импульсные методы нагружения все более широко используются для различных технологических операций: разделение (резка, вырубка-пробивка и подобные); формообразование (гибка, формовка, вытяжка деталей из листовых заготовок; обжатие, раздача и развальцовка трубчатых заготовок); образование неразъемных соединений (сварка, клепка, запрессовка, соединение труб опрессовкой); упрочнение материала и деталей; объемная штамповка, прессование металлических порошков (рис. 2.5).

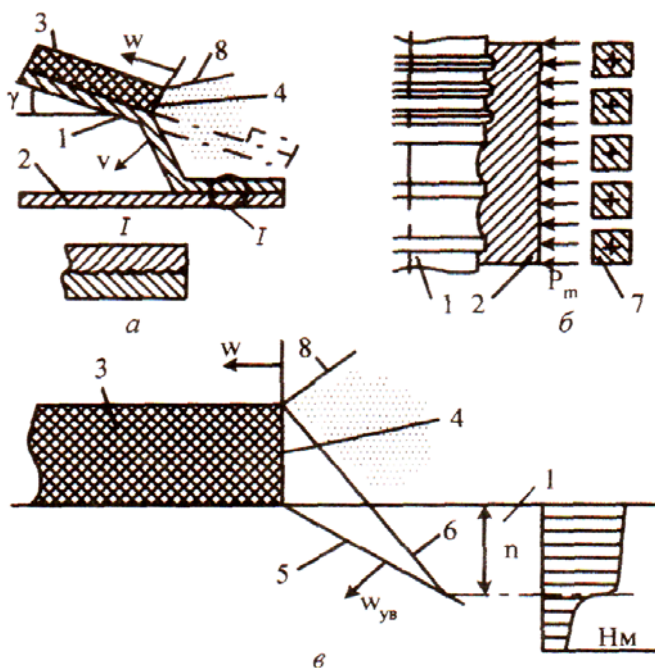


Рис. 2.5. Схемы импульсных методов получения неразъемных соединений и упрочнения поверхности деталей:

а – сварка взрывом; *б* – магнитно-импульсная опрессовка деталей;
в – взрывное упрочнение поверхности деталей; 1, 2 – детали; 3 – заряд ВВ;
 4 – фронт детонационной волны; 5 – фронт ударной волны; 6 – фронт волны разгрузки; 7 – индуктор; 8 – граница разлета продуктов детонации

Энергия взрыва все чаще используется при формообразовании крупногабаритных деталей и деталей из высокопрочных металлов и сплавов. Применение для этих целей традиционных методов штамповки возможно лишь на сверхмощных уникальных прессах и требует сложной технологической оснастки (например, матриц).

В качестве энергоносителей применяются конденсированные взрывчатые вещества (аммониты, тротил, гексоген), порох, газообразные взрывчатые вещества, сжиженные газы. Стоимость изготовления деталей уменьшается в 10–15 раз.

Для развития штамповки взрывом в современном машиностроении решают следующие задачи:

1. Разработка таких схем процесса, чтобы основная часть энергии затрачивалась на деформацию заготовки и мало влияла на конструкцию.

2. Механизация и автоматизация вспомогательных операций (установка, зажим, снятие детали, транспортировка матриц).

3. Использование профилирующих зарядов, обеспечивающих формообразование деталей без применения матриц. Ряд переходов формовки может быть произведен на одной матрице, при этом первичные переходы будут выполняться по способу свободной формовки, с разными значениями заряда, с промежуточными отжигами; последний переход (калибровочный) выполняется по форме матрицы.

Штамповка взрывом в вакуум-камере наиболее перспективна, так как не вызывает существенного сейсмического эффекта, а звуковой эффект поглощается вакуум-камерой.

Преимущества метода ЭГШ:

1. ЭГШ мобильна, легко встраивается в поточные линии, может применяться в обычных цеховых условиях.

2. Возможны повторные разряды с изменением фронта ударной волны, ее интенсивности без переналадки установки.

3. Процесс позволяет распределять силы давления и воспроизводить отдельные циклы, что предпочтительно для автоматизации.

Детали, изготавливаемые ЭГШ, по конструктивным особенностям, форме исходной заготовки и виду осуществляемой операции разделяются на два класса: полученные из плоских и из трубчатых (цилиндрических или конусных) заготовок. Использовать ЭГШ целесообразно для изготовления значительной группы деталей самолетов:

а) детали замкнутой формы (типа обечаек, коков) – из кольцевых конических и цилиндрических заготовок;

б) детали простых осесимметричных форм типа днищ – из плоских заготовок;

в) детали типа окантовок, жесткостей, крышек люков – из плоских заготовок сложных форм.

С применением ЭГШ можно выполнять операции вытяжки, формовки, калибровки, пробивки отверстий, отбортовки на заготовках из цветных сплавов, стали, высокопрочных сплавов.

Наиболее целесообразно применять ее для деталей сложных форм (толщина деталей обычно не превышает 4–5 мм, а габаритные размеры – 500–600 мм). Существуют установки ЭГШ, позволяющие штамповать детали толщиной до 10 мм и более.

Преимущества метода МИОМ:

- высокая производительность технологического процесса;
- легкая автоматизация и механизация ТП;
- большая технологическая гибкость операции;
- простота технологической оснастки;
- возможность получения больших удельных давлений до 109 Н/мм^2 при использовании одноразовых индукторов;
- высокая культура производства и простота обслуживания оборудования МИОМ одним рабочим;
- выполнение технологических операций в труднодоступных местах;
- улучшение обрабатываемости материала и пластических свойств алюминиевых сплавов (удлинение материала; улучшение конечных механических свойств; улучшение структуры (более плотная); упрочнение материала).

Недостатки МИОМ:

1. Трудно получить с помощью детали с глубокой вытяжкой материала.

2. Не все металлы и их сплавы могут деформироваться без промежуточных, хорошо проводящих ток «спутников».

3. Не любая форма обрабатываемой заготовки пригодна для формообразования.

4. Имеются ограничения на толщину и диаметр обрабатываемых трубчатых заготовок.

2.2. Лазерное упрочнение [16 – 18]

Лазер – источник оптического когерентного излучения, характеризующегося высокой степенью монохроматичности, направленностью и большой плотностью энергии. Один из основных приборов квантовой электроники. Первый рубиновый лазер был создан в 1960 г. Т. Мейманом (рис. 2.6); первый газовый лазер – А. Джаваном. Главный элемент лазера – активная среда, для образования которой используют различные методы накачки. Разработаны лазеры на основе газовых, жидкостных и твердотельных активных сред (в том числе на диэлектрических кристаллах, стеклах, полупроводниках). Лазеры применяются в научных исследованиях (в физике, астрономии, химии, биологии и других областях), медицине (хирургии, офтальмологии и т. п.), а также в технике. Лазеры позволили осуществить эффективную оптическую (в том числе космическую) связь и локацию. Основой процесса лазерного упрочнения является быстрый нагрев до высокой температуры (температуры плавления) поверхностного слоя металла с последующим быстрым охлаждением путем отвода тепла в основной объем металла, который остается практически холодным.

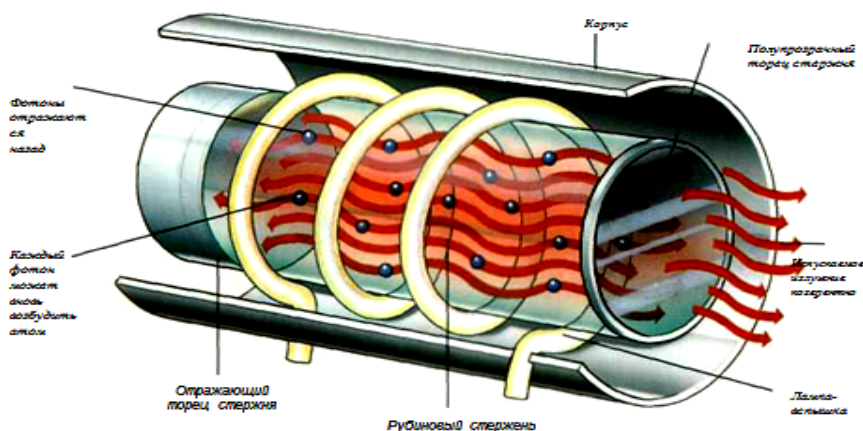


Рис. 2.6. Устройство рубинового лазера

В принципе необходимое повышение температуры металла можно получить и стандартными методами – нагревом в термической

или индукционной печи. Однако эти методы часто являются непригодными из-за неоднородности нагрева. Кроме того, в крупногабаритных деталях очень часто необходимо закалить только часть поверхности, а не весь объем детали. Поверхностную обработку детали можно сделать только лазерной термообработкой, которая может проводиться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. Чаше всего используют обработку без оплавления с сохранением исходной шероховатости $R_a = 0,16 - 1,25$ мкм. Глубина упрочняемого слоя металла определяется величиной допустимого линейного износа.

Производительность лазерного упрочнения определяется формулой (2.1):

$$G_{\text{лаз.терм.}} = K_{\text{п}} V d_0, \quad (2.1)$$

где $K_{\text{п}}$ – коэффициент перекрытия;

V – скорость движения луча (детали);

d_0 – диаметр пучка (ширина дорожки упрочнения), $d_0 = 1-1,5$ мм и более.

Лазерная закалка, проводимая с помощью оптического квантового генератора (лазера), перспективна для изделий, долговечность которых лимитируется износостойкостью и сопротивлением усталости, особенно если закалка другими методами затруднена вследствие сложности конфигурации детали и возможности ее значительного коробления при нагревании до закалочных температур. Поверхностное упрочнение лучом лазера характеризуется рядом особенностей, позволяющих обеспечить: упрочнение локальных (по глубине и площади) объемов материала обрабатываемых деталей в местах их изнашивания (твердость упрочняемых участков может превышать на 15–20 % и более твердость, достигаемую после термической обработки существующими способами); локальное упрочнение поверхностей труднодоступных углублений или полостей, в которые луч лазера может быть введен с помощью несложных оптических устройств; «пятнистое» поверхностное упрочнение значительных площадей деталей; заданную микрошероховатость упрочненных поверхностей; определенные физико-механические, химические и другие свойства поверхностей обрабатываемых деталей легированием их различными элементами с помощью лазерного излучения; отсутст-

вие деформаций обрабатываемых деталей благодаря локальности термической обработки, что позволяет полностью исключить необходимость дополнительного финишного шлифования; простоту автоматизации процесса обработки лучом лазера по контуру, в том числе деталей сложной формы, так как лазерный нагрев осуществляется бесконтактно.

Лазерную обработку применяют для повышения стойкости деталей штампов, пресс-форм, режущего инструмента и деталей, имеющих рабочие поверхности, доступные для обработки лучом лазера, в том числе с использованием оптических и управляющих систем. Поверхностной лазерной обработке подвергают инструмент, прошедший термическую обработку, окончательное шлифование и заточку.

Лазерному упрочнению подвергают стали: углеродистые, низкоуглеродистые, легированные (У8А, У10А, 45, ХВГ, 9ХС и др.), высоколегированные (Х12, Х12М, Х12Ф, ХВГ, ХШ15, Х, 5ХВ2С), низкоуглеродистые цементованные (20, 12ХН3А), хромистые коррозионно-стойкие (4Х13), быстрорежущие (Р18, Р12, Р5, Р6М5, Р9).

Метод основан на использовании явления высокоскоростного разогрева металла под действием энергии лазерного луча до температур, превышающих температуру фазовых превращений A_{c1} , но ниже температуры плавления и последующего высокоскоростного охлаждения за счет отвода тепла с поверхности в основную массу металла. При обработке лазерным лучом, как и в случае обычной закалки, в стали образуются мартенсит и остаточный аустенит. Твердость в зоне обработки повышается с 650–800 до 850–1100 НV, что обусловлено образованием в структуре более мелкозернистого мартенсита в результате быстрого нагрева и охлаждения. Глубина упрочненной зоны достигает 0,2 мм.

Возможна обработка *перекрывающимися и неперекрывающимися* дорожками. При наложении дорожки упрочнения происходит частичный нагрев предыдущей упрочненной зоны, что может привести к отпуску и снижению твердости. При обработке неперекрывающимися дорожками зазор между ними составляет 10–30 % от площади обрабатываемой поверхности, происходит уменьшение износа в 2–3 раза. Лазерное упрочнение применяется для обработки коленчатых валов двигателей, гильз цилиндров, зубчатых колес, деталей химического, нефтяного и бурового оборудования.

Лазерная наплавка порошковых материалов обеспечивает получение наплавленного слоя высокой степени однородности и качества без значительного термического влияния на нижележащие слои металла. Применяют порошки хрома, бора, никеля, кремния.

Сущность процесса наплавки заключается в нанесении на поверхность детали слоя порошка и последующего его расплавления лучом лазера (рис. 2.7). Порошок диффундирует в основной металл, а быстрое остывание позволяет получить однородную структуру поверхностного слоя. После последующей шлифовки толщина наплавки может достигать 0,2–0,4 мм, повышается износостойкость наплавленного слоя в 2–3 раза.

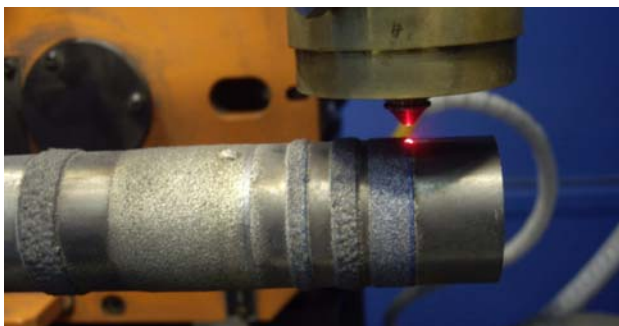


Рис. 2.7. Процесс лазерной наплавки

2.3. Плазменные технологические процессы в металлообработке и машиностроении [18, 20, 21]

Плазма (от греч. *πλάσμα* «вылепленное», «оформленное») – частично или полностью ионизированный газ, образованный из нейтральных атомов (или молекул) и заряженных частиц (ионов и электронов).

Плазма иногда называется четвертым (после твердого, жидкого и газообразного) агрегатным состоянием вещества. *Четвертое состояние вещества было открыто У. Круксом в 1879 году и названо «плазмой» И. Ленгмюром в 1928 году, возможно из-за ассоциации с плазмой крови.*

По современным представлениям, фазовым состоянием большей части вещества (по массе около 99,9 %) во Вселенной является плаз-

ма. Все звезды состоят из плазмы, даже пространство между ними заполнено плазмой, хотя и очень разреженной (межзвездное пространство). К примеру, планета Юпитер сосредоточила в себе практически все вещество Солнечной системы, находящееся в «неплазменном» состоянии (жидком, твердом и газообразном).

Плазму делят на низкотемпературную (температура меньше миллиона К) и высокотемпературную (температура миллион К и выше). Такое деление обусловлено важностью высокотемпературной плазмы в проблеме осуществления управляемого термоядерного синтеза. Разные вещества переходят в состояние плазмы при разной температуре, что объясняется строением внешних электронных оболочек атомов вещества: чем легче атом отдает электрон, тем ниже температура перехода в плазменное состояние.

Низкотемпературной называют плазму, у которой средняя энергия электронов меньше характерного потенциала ионизации атома (< 10 эВ). Обычно Н. п. слабоионизованная, т. е. число нейтральных атомов и молекул значительно превышает число заряженных частиц – электронов и ионов. Отношение числа ионизованных атомов к полному их числу в единице объема называется степенью ионизации плазмы. Н. п. в соответствии с физическими свойствами может быть стационарной, нестационарной, равновесной, неравновесной, идеальной, неидеальной.

В настоящее время сложилось два направления в применении плазменных технологий. Первое направление охватывает технологии, использующие плазму в традиционных отраслях промышленности: металлургия, металлообработка и энергетика. Вторая область объединяет все многообразие относительно новых плазмохимических технологий, используемых в химической и других отраслях промышленности.

К плазмохимическим технологиям относятся процессы получения ацетилена, этилена, синтез-газа и т. д. из природного газа, угля и другого органического сырья, синтез тонких пленок для микроэлектроники и особо чистых ультрадисперсных порошков Si, Al_2O_3 , SiC, Si_3N_4 , TiN и др. Технологии плазмохимической переработки и обезвреживания токсичных промышленных и бытовых отходов играют особую роль и являются сегодня перспективными при решении известных проблем экологии. В данной главе рассмотрены физические основы плазменных технологий, имеющих наибольшее

применение в действующем производстве. В этих технологических процессах используется как термически равновесная (электродуговая), так и неравновесная (холодная) плазма.

В технологических процессах металлообработки используются как высокотемпературные потоки электродуговой плазмы (т. е. термические плазменные струи), так и плазмотроны с вынесенной дугой. Во втором случае в качестве анода обычно служит поверхность обрабатываемой детали. При этом на поверхность детали действует не только поток плазмы, генерируемой в канале ЭДП, но и совокупность электрофизических процессов, протекающих в анодном пятне.

В процессах плазменной очистки, упрочнения и модификации поверхностей используют в основном потоки неравновесной плазмы тлеющего или ВЧ разрядов. Общим для всех плазменных технологий металлообработки является то, что материалы подвергаются комплексному воздействию разных по физической природе потоков энергии. Во всех случаях на обрабатываемую поверхность детали воздействует энергия электрически заряженных компонентов плазмы, тепловая энергия и газодинамический напор плазменной струи, а также интенсивное излучение плазмы в широком диапазоне длин волн. Кроме того, поверхность обрабатываемой детали пронизывают силовые линии электрического и магнитного полей, на ней происходят различные химические реакции, образуются новые соединения и тонкие пленки.

Локальное воздействие концентрированных потоков всех этих видов энергии приводит к появлению на поверхности материала малых возмущений, которые сопровождаются процессами локального термического нагрева, плавления, выдувания расплава из зоны нагрева и испарения. В кристаллической решетке металла возникают точечные и линейные дефекты в виде внедрения атомов плазмообразующего газа и молекул новых химических соединений, различных вакансий, линейных дислокаций и т. д. Величина энергетического воздействия на поверхность и вклад отдельного вида энергии находятся в сильной зависимости от мощности разряда и типа плазмотрона, рода и расхода плазмообразующего газа.

Плазменно-дуговая резка – процесс, при котором металлы разрезаются расплавлением ограниченной области энергией дуги с удалением расплавленного металла высокоскоростным потоком горячего ионизированного газа из плазменной горелки (рис. 2.8). К преимуществам

ществам плазменной резки относится возможность обрабатывать любые металлы (черные, цветные, тугоплавкие), высокая скорость резания малых и средних толщин, небольшой и локальный нагрев разрезаемой заготовки, возможность сложной фигурной вырезки и отсутствие ограничений по геометрической форме.



Рис. 2.8. Процесс плазменной резки металла

Сущность процесса плазменной наплавки заключается в следующем: расплавленный присадочный порошковый или проволоочный материал наносится на металлическую поверхность в виде покрытия, при этом источником нагрева является сжатая дуга, горящая между электродом плазмотрона и изделием (рис. 2.9).

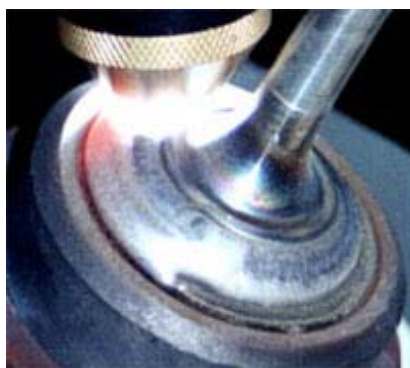


Рис. 2.9. Плазменная наплавка изношенной поверхности тарелки клапана

Плазменная поверхностная закалка – метод локального поверхностного упрочнения. Сущность процесса состоит в высокоскоростном нагреве движущейся сжатой дугой поверхностного слоя металла, а затем быстром его охлаждении в результате передачи теплоты в глубинные слои материала детали. После плазменной закалки детали и инструмент имеют упрочненный поверхностный слой глубиной примерно 0,7–1,5 мм, как правило, достаточный для деталей ответственного назначения.

Для осуществления различных видов плазменной обработки материалов (резки, сварки, напыления, поверхностного упрочнения, легирования) используются установки, которые включают источник питания с аппаратурой управления; плазмотрон и механизмы, обеспечивающие его равномерное перемещение над обрабатываемой поверхностью.

Плазмотрон – газоразрядное устройство для получения струи плотной (с давлением порядка атмосферного) низкотемпературной плазмы с помощью электрических разрядов в газах (рис. 2.10).

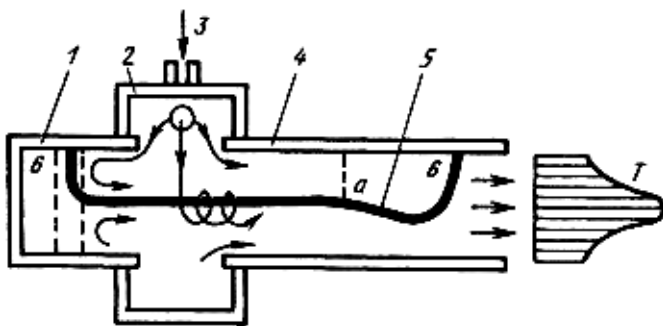
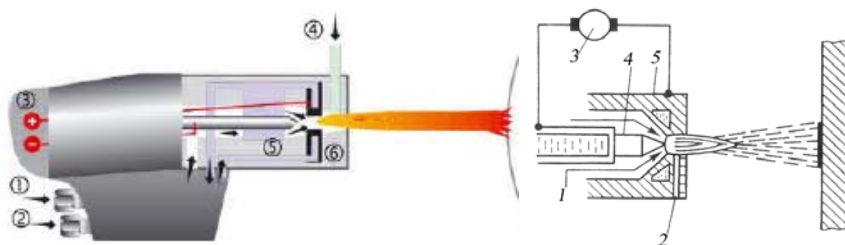


Рис. 2.10. Схема плазмотрона с вихревой стабилизацией разряда:
1, 4 – электроды; 2 – вихревая камера; 3 – подача рабочего газа; 5 – дуга;
б – опорное пятно дуги

Плазменное напыление и наплавка – процесс нанесения покрытий с помощью плазменной струи (рис. 2.11).

К плазмотронам предъявляются следующие требования: мощность; высокая энергетическая эффективность; стабильность параметров плазменного потока; большая длительность непрерывной работы; надежность конструкции; простота обслуживания; возможность использования различных плазмообразующих газов.



Принцип работы установки плазменного напыления SG-100

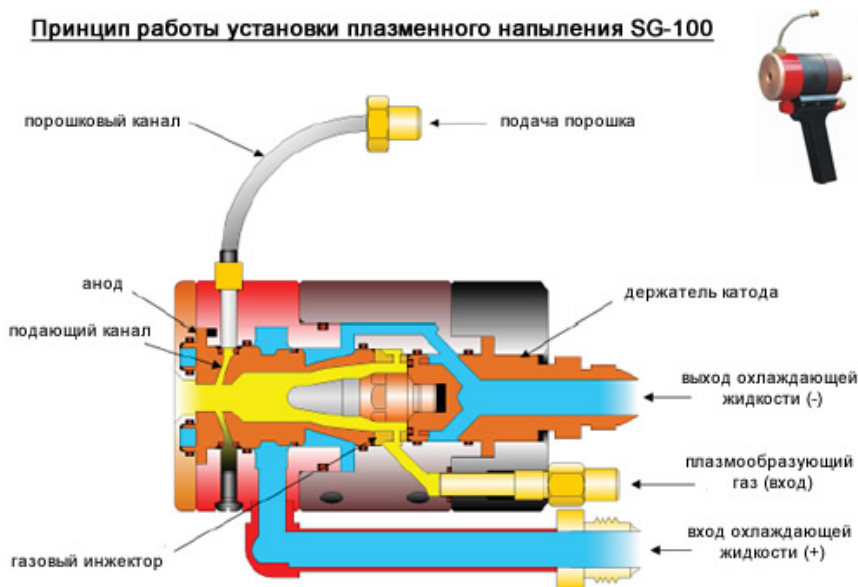


Рис. 2.11. Схема головки плазмотрона на примере установки SG-100:
 1 – плазмообразующий газ; 2 – канал для введения напыляемого порошка;
 3 – источник электроэнергии; 4 – катод; 5 – анод

Мощность плазмотрона зависит от вида электроплазменного процесса, может меняться от единицы киловатт до нескольких сотен мегаватт. Для напыления и плазменного упрочнения используются дуговые плазмотроны мощностью до 100 кВт.

В зависимости от схемы подключения анода различают:

1. Открытую плазменную струю (анодом является деталь или прут). В этом случае происходит повышенный нагрев детали. Используется эта схема при резке металла и для нанесения покрытий.

2. Закрытую плазменную струю (анодом является сопло или канал горелки). Хотя температура сжатой дуги на 20–30 % в этом случае выше, но интенсивность потока ниже, т. к. увеличивается теплоотдача в окружающую среду. Схема используется для закалки, металлизации и напыления порошков.

Комбинированная схема (анод подключается к детали и к соплу горелки). В этом случае горят две дуги. Схема используется при наплавке порошком.

Наплавку металла можно реализовать двумя способами:

- 1) струя газа захватывает и подает порошок на поверхность детали;
- 2) вводится в плазменную струю присадочный материал в виде проволоки, прутка, ленты.

В качестве плазмообразующих газов можно использовать аргон, гелий, азот, кислород, водород и воздух. Наилучшие результаты сварки получаются с аргоном.

На практике применяют несколько разновидностей плазменной наплавки. Их отличия заключаются в типе присадочного материала (порошок, проволока, шнур), способах его подачи и в электрической схеме подключения.

Способ, когда наплавку ведут порошком и проволокой одновременно, называется комбинированным. Порошок может подаваться путем его вдувания на поверхность детали в зону дуги транспортирующим газом (внутренняя подача), а также свободно под действием гравитационных сил либо с помощью механизма подачи (для проволоки), т. е. внешней подачей.

По способу подключения источника питания наплавка ведется дугой прямого или косвенного действия. В обоих случаях дуга обеспечивает переход рабочего газа в плазменное состояние путем ионизации. Образующаяся высокотемпературная плазменная струя обеспечивает разогрев поверхности детали и плавление наплавочного материала.

Плазменная наплавка выполняется одиночными валиками по винтовой линии или с применением механизма колебаний плазмотрона. В последнем случае получают широкие слои, ширина которых равняется амплитуде колебаний.

К преимуществам плазменной наплавки следует отнести высокую производительность, надежную защиту зоны наплавки от окисления, локальность нагрева за счет высокой концентрации тепловой

энергии и обжатия дуги потоком газа. В сравнении с напылением плазменный поток при наплавке более ламинарный, устойчивый, экономичный по использованию материалов (потери порошка около 2 %) и газов.

Для восстановления и упрочнения внешних цилиндрических поверхностей деталей типа «вал» эффективен способ скоростной наплавки с внешней подачей порошка. Он обеспечивает нанесение тонкослойных упрочняющих покрытий (0,2–1,2 мм) при незначительном термическом влиянии на основной материал, отличается минимальным расходом энергии и газа, повышенной производительностью. Припуск на окончательную механическую обработку составляет 0,1–0,3 мм.

Достоинствами плазменной наплавки являются:

1. Высокая концентрация тепловой мощности и возможность минимальной ширины зоны термического влияния.
2. Возможность получения толщины наплавляемого слоя от 0,1 мм до нескольких миллиметров.
3. Возможность наплавления различных износостойких материалов (медь, латунь, пластмасса) на стальную деталь.
4. Возможность выполнения плазменной закалки поверхности детали.
5. Относительно высокий КПД дуги (0,2–0,45).

На рис. 2.12 представлена схема структуры плазменных покрытий, полученных напылением порошковых материалов. На рис. 2.13 изображена схема скоростной плазменной наплавки.

Режимы плазменной наплавки (на установке скоростной плазменной наплавки, оснащенной источником питания УПС-301 или УПНС-304 и плазмотроном СИБ-4): сила тока $I = 90\text{--}170$ А, напряжение $U = 30\text{--}35$ В, поперечная подача плазмотрона $S = 1,5\text{--}2$ мм/об, дистанция наплавки 8–10 мм. Число оборотов детали зависит от диаметра наплавляемой поверхности и составляет, например, для диаметров 17–55 мм – 80–30 об/мин соответственно. Наиболее приемлем диффузионно-легированный порошок на основе ПР-Сталь45 с гранулометрическим составом 40–160 мкм. Расход порошка составляет около 35 г/мин. Толщина наплавленного слоя за один проход составляет 0,5–1,5 мм. Требуемая твердость наплавленного покрытия в диапазоне 35–60 HRC_э, например, для деталей ДВС обеспечивается соответствующими параметрами диффузионной обработки порошка.



Рис. 2.12. Схема формирования плазменных покрытий и их структура

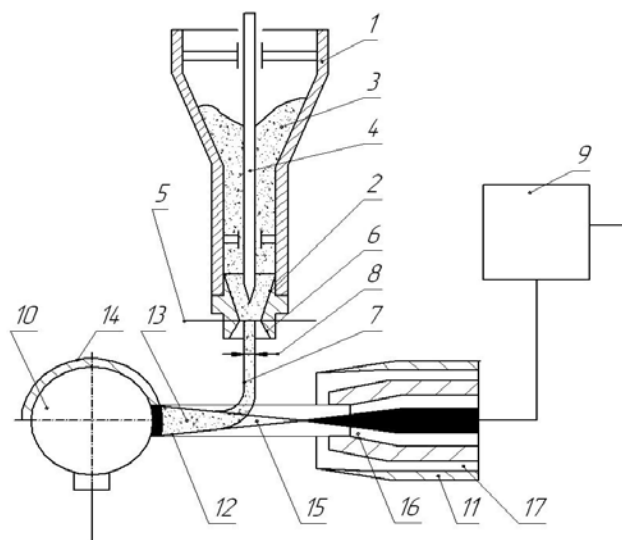


Рис. 2.13. Метод скоростной плазменной наплавки (схема способа плазменной наплавки с подачей порошка в дугу под действием собственного веса):
 1 – бункер; 2 – отверстие для дозирования; 3 – порошок; 4 – запорная игла;
 5 – выходное сечение пропускного отверстия; 6 – защитный козырек; 7 – поток порошка; 8 – размер сечения потока; 9 – источник сварочного тока; 10 – деталь (изделие); 11 – плазматрон; 12 – дуга; 13 – поток порошка; 14 – наплавленный слой;
 15 – столб дуги; 16 – внутреннее сопло; 17 – наружное сопло

2.4. Метод ионной имплантации [21]

Ионная имплантация – введение легирующих примесей в материалы, синтез новых соединений, изменяющих механические, коррозионные, каталитические, электрические, оптические и др. свойства приповерхностных слоев. Это – современный метод поверхностного упрочнения материалов. Зарождение этой группы технологий можно отнести к 70-м годам (полупроводники) и к 80-м годам (металлы) XX века.

Метод ионной имплантации основан на внедрении в твердое тело ускоренных ионизированных атомов и молекул. При этом возможны любые комбинации ион – мишень. Энергия ионов может изменяться от нескольких килоэлектронвольт до гигаэлектронвольт. Глубина внедрения ионов зависит от их энергии, массы, а также от массы атомов мишени (рис. 2.14).

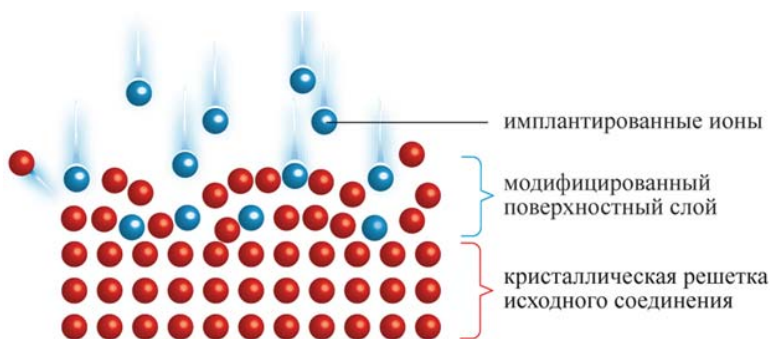


Рис. 2.14. Схема упрочнения методом ионной имплантации

Различают ионную имплантацию при непрерывном облучении слаботочными ионными пучками и короткоимпульсную ионную имплантацию под действием мощных импульсных ионных пучков.

На рис. 2.15 представлена схема установки для ионной имплантации.

При исследовании изменения свойств веществ под действием ионной бомбардировки следует учитывать три основных эффекта:

- непосредственное внедрение примеси из пучка (собственно имплантация);

- структурные превращения, т. е. образование и накопление радиационных дефектов, аморфизацию или рекристаллизацию и т. п.;
- распыление, т. е. выбивание атомов из поверхностных слоев в вакуум.

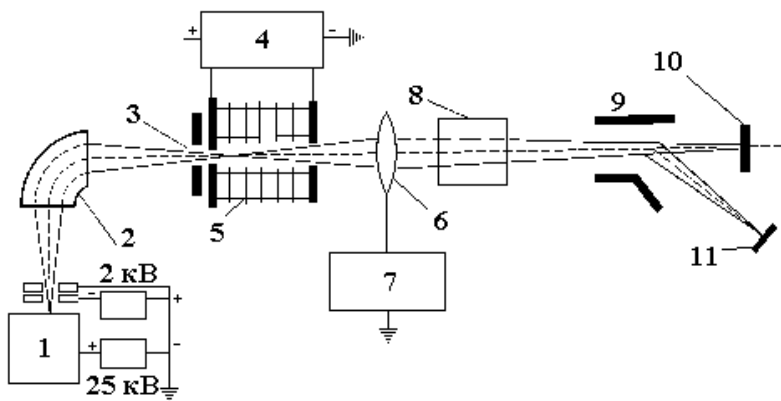


Рис. 2.15. Схема установки для ионной имплантации:

- 1 – источник ионов; 2 – масс-спектрометр; 3 – диафрагма; 4 – источник высокого напряжения; 5 – ускоряющая трубка; 6 – линзы; 7 – источник питания линз;
 8 – система отклонения луча по вертикали и система отключения луча;
 9 – система отклонения луча по горизонтали; 10 – мишень для поглощения нейтральных частиц; 11 – подложка

Ионная бомбардировка позволяет изменять практически все свойства приповерхностной области твердого тела: электрофизические, механические (прочность, твердость, коэффициент трения, износостойкость), коррозионные, каталитические, оптические, эмиссионные.

С помощью ионной имплантации создаются различные элементы электронных полупроводниковых приборов и интегральных микросхем, например: транзисторы, конденсаторы, резисторы, контактные площадки и др.

Ионный синтез (создание соединений в результате ионной бомбардировки). Ионным синтезом можно создавать: защитные пленочные покрытия, изолирующие слои при изготовлении интегральных схем (например, слои Si_3N_4 , SiC , SiO_2), антикоррозионные покрытия, световоды, светоизлучающие диоды для разных диапазонов длин волн, сверхпроводящие материалы.

Ионной имплантацией можно создавать новые, метастабильные, сплавы и соединения, обладающие уникальными свойствами (механическими, коррозионными, сверхпроводящими, каталитическими, магнитными и электрическими). Необходимая доза (флюенс ионов) для обработки металлов – не ниже 10^{17} ион/см².

2.5. Электронно-лучевые технологии [17]

Обладея рядом преимуществ перед традиционными способами обработки поверхностей изделий, электронно-лучевые технологии, наряду с лазерными, занимают одну из лидирующих позиций среди технологий модифицирующего воздействия на изделия не только машиностроительной отрасли, но и в металлургии, микроэлектронике, медицине и т. д. Несмотря на первоначальную направленность применения электронных пучков в качестве инструмента для реализации электронно-лучевой сварки, в последнее время активно развиваются технологии получения тонких пленок, очистки поверхности, локального упрочнения и прочие.

Электронные пучки широко применяются для решения таких технологических задач, как:

- электронно-лучевая сварка;
- наплавка;
- модификация поверхности материалов и изделий (прямая и осаждение модифицирующих покрытий),
- спекание композитных материалов,
- нетермическая электронно-лучевая обработка (например, электронно-стимулированные химические реакции, и др.

Электронно-лучевая сварка. Электронно-лучевая сварка – сварка с высокой концентрацией энергии. Сущность процесса состоит в использовании кинетической энергии потока электронов, движущихся с высокими скоростями. Для уменьшения потери кинетической энергии электронов за счет соударения с молекулами газов воздуха, а также для химической и тепловой защиты катода в электронной пушке создают вакуум порядка $0,1\text{--}10^{-4}$ Па. Достоинства электронно-лучевой сварки: высокая плотность мощности в пучке, которая выделяется не только на поверхности изделия, но и на некоторой глубине в объеме основного металла; малое количество

вводимой энергии, в сравнении с другими технологиями получения сварных соединений с аналогичными параметрами шва; отсутствие насыщения расплавленного и нагретого металла газами.

Электронно-лучевой переплав. Физической основой процесса электроннолучевого переплава, является превращение кинетической энергии электронов, разогнанных в электрическом поле до скоростей 10^4 – 10^5 м/с, в тепловую, при их торможении в поверхностном слое металла. Под влиянием бомбардировки ускоренными электронами осуществляется нагрев и плавление торца расходимой заготовки, а расплавленный металл стекает при этом в водоохлаждаемый медный кристаллизатор, где создается ванна жидкого металла, подогреваемая электронными лучами (рис. 2.16). По мере плавления расходимой заготовки осуществляют вытягивание формируемого слитка со скоростью, обеспечивающей поддержание постоянного уровня жидкой ванны в кристаллизаторе. Так как при столкновении с атомами и молекулами газовой среды электроны теряют свою энергию и рассеиваются, то внутреннее пространство электронной пушки откачивают вакуумными насосами до давления 10^{-2} – 10^{-3} Па, а камеры плавки – до давления 10^{-1} – 10^{-2} Па. Технология электронно-лучевого переплава позволяют получать сверхчистые вещества, включая металлы и полупроводники (кремний), за счет рафинирования в вакууме, сопровождающего переплав.

Электронно-лучевое нанесение покрытий. При электронно-лучевом нанесении вакуумных покрытий нагрев и испарение вещества осуществляются в результате теплового действия электронов, бомбардирующих испаряемую мишень. Данным методом получают покрытия из сплавов металлов, полупроводников и даже диэлектриков. Электронно-лучевое нанесение покрытий характеризуется следующими преимуществами: при электронно-лучевом испарении капельная фаза практически отсутствует; при использовании составных тиглей (испаряемых материалов) достаточно просто изменять химический состав испаряемых частиц и их пространственное распределение; возможность автоматизации процесса испарения и, соответственно, нанесения покрытия в целом; получение химически чистых покрытий, т. к. нагревается только испаряемый материал.

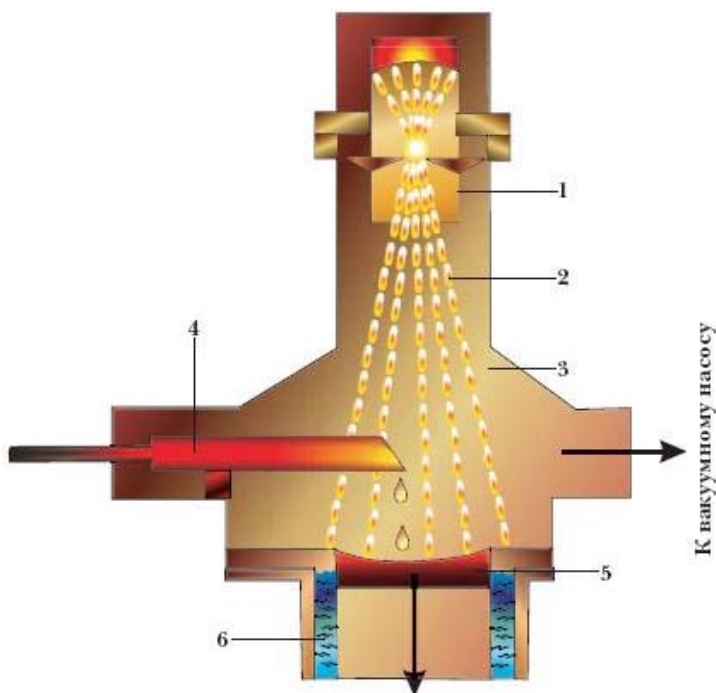


Рис. 2.16. Схема электронно-лучевой плавки:

1 – электронная пушка; 2 – электронный пучок; 3 – плавильная камера;
4 – расплавляемый образец; 5 – выплавляемый слиток; 6 – охлаждаемый водой
медный катализатор

Для реализации технологий электронно-лучевого нанесения покрытий необходимо: ускоряющее напряжение до 10 кВ; плотность мощности 10^4 – 10^5 – Вт/см; скорость роста покрытий – 10–60 нм/с. Однако электронно-лучевые методы нанесения покрытий посредством высокоэнергетичных пучков имеют ряд недостатков: относительно невысокий КПД электронно-лучевых устройств, поскольку более 25 % потребляемой мощности идет на вторичное электронное излучение, нагрев тигля и т. д.; в процессе роста покрытия поверхность подложки подвергается воздействию высокоэнергетичных электронов, что может приводить к возникновению дефектов. Поэтому интересным представляется разработка методов нанесения покрытий с помощью низкоэнергетичных электронных и ионных пучков.

2.6. Ионно-лучевое упрочнение [21]

Ионно-плазменное азотирование (ИПА) – метод химико-термической обработки изделий из стали и чугуна с большими технологическими возможностями, позволяющий получать диффузионные слои нужного состава путем использования разных газовых сред, т. е. процесс диффузионного насыщения управляем, он может быть оптимизирован в зависимости от конкретных требований к глубине слоя и твердости поверхности. Упрочняющей обработке методом ИПА могут подвергаться различные детали и инструменты. В результате ИПА можно улучшить следующие характеристики изделий: износостойкость, усталостную выносливость, антизадирные свойства, теплостойкость и коррозионную стойкость.

В сравнении с такими широко используемыми способами упрочняющей химикотермической обработки стальных деталей, как цементация, нитроцементация, цианирование и газовое азотирование в печах, метод ИПА имеет следующие основные преимущества: более высокая поверхностная твердость азотированных деталей; отсутствие деформации деталей после обработки и высокая чистота поверхности; повышение предела выносливости и увеличение износостойкости обработанных деталей; более низкая температура обработки (400–600 °С), благодаря чему в стали не происходит структурных превращений; возможность обработки глухих и сквозных отверстий; сохранение твердости азотированного слоя после нагрева до 600–650 °С; возможность получения слоев заданного состава; возможность обработки изделий неограниченных размеров и форм; отсутствие загрязнения окружающей среды; повышение культуры производства; снижение себестоимости обработки в несколько раз.

Принцип действия ИПА заключается в том, что в разряженной (от единиц до сотен паскаль) азотсодержащей газовой среде между катодом (деталью) и анодом (стенками вакуумной камеры) возбуждается газовый разряд, образующий активную среду (ионы, атомы, возбужденные молекулы), обеспечивающую формирование азотированного слоя, состоящего из внешней – нитридной зоны и располагающейся под ней диффузионной зоны. Технологическими факторами, влияющими на эффективность ионного азотирования, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление,

состав и расход рабочей газовой смеси. Основным недостатком такого процесса является существенное время воздействия (десятки и сотни часов), необходимого для достижения требуемой толщины. Поэтому современные исследования по улучшению этого метода направлены на поиск способов уменьшения время обработки. Одним из факторов, способствующих этому, является температура подложки. Для повышения температуры подложки применяют различные нагреватели. Электронный пучок способен обеспечить эффективный управляемый локальный (поверхностный) нагрев. Поэтому предполагается перспективным использование электронного пучка, для повышения температуры подложки и, тем самым увеличивая эффективность азотирования.

2.7. Метод магнитно-электрического упрочнения [19]

По своей физической сущности и плотности мощности метод магнитно-электрического упрочнения (МЭУ) имеет много общего с технологией электроискрового легирования (ЭИЛ). В обоих случаях обрабатываемая деталь является катодом, а обрабатывающий электрод-инструмент – анодом. При этом между электродом и упрочняемым изделием под действием пульсирующего тока возбуждается искровой разряд, в результате которого происходит перенос наплавляемого материала на катод.

Для реализации способа МЭУ используется малогабаритное и простое в обслуживании оборудование, созданное покрытие имеет высокую прочность сцепления с основным материалом, поверхность не требует специальной подготовки перед упрочнением, имеется возможность создания поверхностного слоя с заданными физико-механическими свойствами, возможно нанесение покрытий как чистыми металлами, так и сплавами. При этом, отличительной особенностью процесса МЭУ является одновременное совокупное энергетическое воздействие на ферромагнитный порошок (ФМП) и обрабатываемую поверхность не только электрического тока, но и внешнего магнитного поля, а также механического воздействия, благодаря чему происходит расплавление частиц ФМП и диффузия этого расплава вглубь обрабатываемой поверхности с формированием покрытия и упрочненного слоя.

Принципиальная схема одного из устройств МЭУ, отражающая сущность процесса на примере обработки наружных цилиндрических поверхностей, приведена на рис. 2.17.

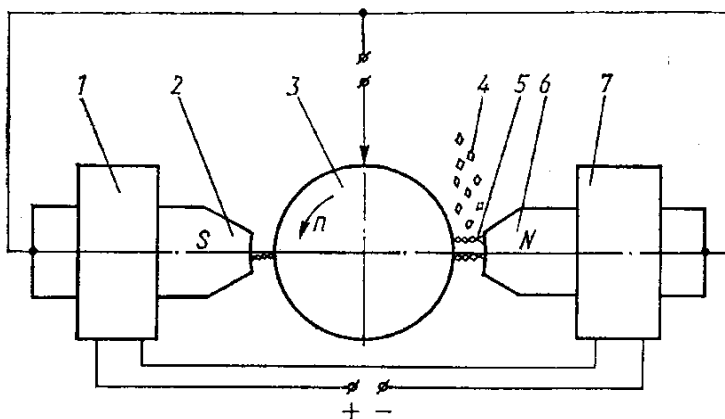


Рис. 2.17. Принципиальная схема МЭУ наружных цилиндрических поверхностей: 1, 7 – электромагниты; 2, 6 – сердечники электромагнитов; 3 – упрочняемая деталь; 4 – упрочняющий порошок; 5 – токопроводящая цепочка

Упрочняемая деталь 3 устанавливается с определенным зазором между полюсными наконечниками 2, 6, являющимися сердечниками электромагнитов 1, 7. Деталь и полюсные наконечники подключены к источнику технологического тока напряжением 20–36 В. В зазор между ними подается ФМП 4, частицы которого, ориентируясь вдоль магнитных силовых линий, образуют токопроводящие цепочки 5. Под действием энергии проходящего по цепочкам тока частицы ФМП расплавляются, и этот расплав наносится на обрабатываемую поверхность в виде точечных вкраплений. Из-за этой особенности процесса обработанная поверхность имеет характерный внешний вид.

В настоящее время наиболее полно исследован и отлажен процесс МЭУ для деталей класса валов. Приведенная схема имеет множество модификаций и конструктивных исполнений. Применяются однополюсные и двухполюсные схемы МЭУ цилиндрических деталей, различные варианты расположения полюсов магнитов относительно обрабатываемой поверхности. При двухполюсной схеме бес-

печивается более высокая производительность ЭМН, а при однополюсной – лучшая сплошность наносимого покрытия. Процесс характеризуется некоторой нестабильностью из-за хаотического формирования многоэлектродной системы и дискретного расплавления в рабочем зазоре цепочек-электродов из частиц ФМП. Дополнительная стабилизация процесса упрочнения деталей цилиндрической формы осуществляется сообщением полюсному наконечнику осциллирующих движений, что позволяет улучшить физико-механические свойства наносимых покрытий. Качество нанесенных покрытий также предлагается улучшить введением дополнительного поверхностного пластического деформирования, шлифования одновременно с упрочнением.

В процессе поверхностного пластического деформирования дополнительным стабилизирующим элементом служит угольный электрод, установленный перед калибрующим роликом и оказывающий термическое влияние на нанесенное покрытие. Положительное влияние поверхностного пластического деформирования на качество наносимых покрытий методом МЭУ хорошо согласуется с данными по воздействию пластического деформирования электроэрозионных покрытий. Стабильность процесса МЭУ и прочность покрытия также повышается, если подачу ФМП осуществлять в потоке рабочей жидкости. При этом рабочая жидкость должна удовлетворять требованиям: низкой коррозионной активности к материалам порошков и обрабатываемой заготовки; высокой температуре вспышки; хорошей фильтруемости; отсутствию запаха и низкой токсичности. В качестве СОЖ широко используются водные растворы эмульсолов Э-2, «Аквол» различной концентрации. Повышение стабильности и равномерности процесса получено в результате использования в рабочей жидкости солей калия, кальция, натрия.

Благодаря широким исследованиям процесса МЭУ цилиндрических деталей, а также разработкам в области стабилизации этого процесса, МЭУ деталей класса валов нашло применение в различных отраслях промышленности. Этот процесс нашел применение в технологиях повышения износостойкости деталей тракторов и автомобилей, сельскохозяйственных машин, металлорежущего оборудования, рыбообрабатывающих судов и др.

2.8. Газотермические методы формирования покрытий [22 – 28]

Упрочнение и восстановление быстроизнашивающихся деталей машин и элементов конструкций методами газотермического напыления покрытий из порошковых, проволочных и прутковых материалов является одним из самых интенсивно развивающихся направлений в ремонтном производстве, при создании ресурсосберегающих технологий, защите от коррозии.

Метод напыления покрытий из расплавленных металлов был предложен *в 1909 году Максом Ульрихом Шоопом (Schoop M. U.)*. Вслед за созданием аппарата для распыления расплавленного металла он в 1912 году изготовил аппарат (названный им «пистолет для пульверизации»), использующий горючий газ для напыления проволоки.

В 1914 году Эрикой Морф (Швейцария) был запатентован портативный аппарат для газопламенного распыления проволок, положивший начало развитию процесса газопламенного напыления проволочных материалов. В 30–50-х годах XX века появились установки индукционного напыления, электродуговой металлизации и газопламенного порошкового напыления. В 60-х годах начали развиваться методы плазменного и детонационного напыления.

К газотермическим способам обычно относят газопламенное, плазменное, детонационное напыление и электрометаллизацию, а также комбинации этих способов. Общее для всех этих методов – нагрев распыляемого материала до высокопластичного состояния или плавления, ускорение частиц или капель газовым потоком и последующее взаимодействие частиц с восстанавливаемой поверхностью. Отличаются методы видом нагрева напыляемого материала и способом ускорения частиц.

Основными параметрами напыленных покрытий, определяющими их качество, являются прочность сцепления с поверхностью детали и плотность слоя. Эти параметры зависят от множества факторов, характеризующих состав и свойства применяемого рабочего газа, наносимого материала, детали, окружающей среды, а также от режимов работы оборудования при подготовке наносимого материала и поверхности детали, при нанесении покрытия и его последующей обработке. Некоторые технико-экономические показатели наиболее распространенных методов ГТН приведены в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Технико-экономические характеристики методов газотермического напыления износостойких и антифрикционных покрытий

Характеристика	Газопламенный (горючий газ пропан-бутан)		Газопламенный сверхзвуковой «Jet-Kote» (порошок)	Электродуговая металлизация (проволока)	Гиперзвуковая металлизация (проволока)	Плазменный (порошок)	Плазменный сверхзвуковой (порошок)	Детонационный (порошок)
	Проволока	Порошок						
Производительность напыления стального покрытия, кг/ч	4–6	5–9	до 10	10–14	до 25	6–8	до 8	2–3
Термический КПД, %	30–40	20–30	10–15	25–35	25–35	4–6	3–5	< 10
Максимальный коэффициент использования материала	0,90	0,95	0,85	0,85	0,90	0,85	0,85	0,80
Скорость частиц, м/с	100–120	20–50	до 700	80–150	250–450	130–200	300–500	до 1000
Прочность сцепления с основой, МПа	30–32	20–30	70–100	30–35	40–70	35–55	70–100	до 160
Удельная себестоимость, \$/кг	6–10	15–25	40–60	5–9	6–10	28–32	35–40	до 50

Поскольку напыленное покрытие формируется путем последовательной укладки множества частиц, сопровождающейся их деформацией, структура и свойства покрытий отличаются от литых материалов того же состава. Факторами, обусловившими эти отличия, являются следующие структурные особенности:

- в отличие от компактного материала, имеющего два типа границ (межзеренные и межфазные), напыленное покрытие имеет еще три типа границ, определяющих его свойства (границы между деформированными частицами, межслойные границы и границы, разделяющие покрытие и подложку);

- кристаллизуясь и охлаждаясь индивидуально, частицы имеют строение, отражающее условия гетерогенной кристаллизации с развитием фронта растущих кристаллов в направлении, противоположном отводу тепла, т. е. перпендикулярно к поверхности формирования;

- при последовательной укладке частиц и слоев неизбежно образуются пустоты (поры);

- строение формируемого за один проход слоя неоднородно и определяется различной температурой и скоростью частиц, летящих в центральной и периферийных зонах потока.

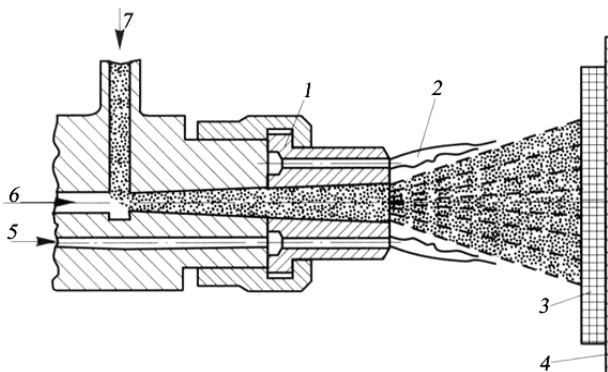
Кроме того, при напылении покрытий происходит интенсивное взаимодействие входящих в их состав элементов с окружающей средой и рабочими газами, в частности, кислородом, что приводит к его растворению в количествах, превышающих растворимость в равновесных условиях кристаллизации. Помимо появления оксидов, многие из которых обладают свойствами твердых смазок, кислород, растворенный в покрытии, способен снижать, по сравнению с исходным напыляемым материалом, энергию перехода в «активное» структурно-неустойчивое состояние, обеспечивающее уменьшение энергетических затрат на относительное перемещение контактирующих поверхностей, что способствует их лучшей структурной приспособляемости.

Все вышеперечисленные факторы обуславливают возможность формирования методами ГТН рабочих поверхностей режущих органов, деталей узлов трения, работающих в очень широком диапазоне нагрузок и скоростей, элементов силовых передач, емкостей для хранения и переработки агрессивных сред, деталей запорной арматуры и т. п.

При газопламенном напылении (ГПН) источником тепловой энергии является газовое пламя, образующееся в результате горения смеси кислород – горючий газ (ацетилен, пропан-бутан, природный

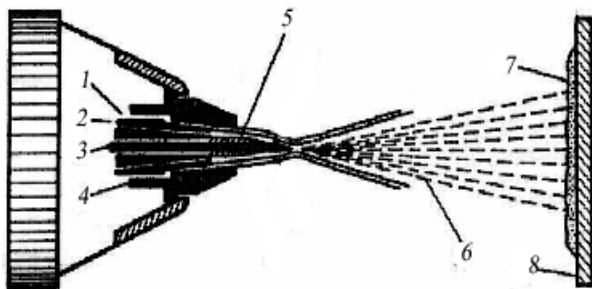
газ и др.). Напыляемый материал подается в высокотемпературную зону пламени в виде порошка, гибкого шнура, проволоки (рис. 2.18), нагревается в факеле до плавления или высокопластичного состояния (в случае напыления тугоплавких порошков) и переносится на поверхность детали, формируя покрытие.

При детонационно-газовом напылении используется специфический источник нагрева, распыления и ускорения расходного материала, представляющий собой высокотемпературный поток газовой смеси, образующейся в результате направленного взрыва.



а

1 – газовое сопло; 2 – факел кольцевого пламени; 3 – покрытие; 4 – подложка;
5 – горючий газ; 6 – кислород; 7 – напыляемый порошок



б

1 – сжатый воздух; 2 – горючая смесь; 3 – расплаиваемая проволока; 4 – сопло;
5 – оплавляемый конец проволоки; 6 – поток распыленных частиц;
7 – покрытие; 8 – подложка

Рис. 2.18. Схемы процессов газопламенного напыления порошками (а) и проволоками (б)

При детонационно-газовом напылении используется специфический источник нагрева, распыления и ускорения расходного материала, представляющий собой высокотемпературный поток газовой смеси, образующейся в результате направленного взрыва (рис. 2.19). Детонационная волна и продукты ее распада обладают высокой скоростью распространения (2 000–3 000 м/с и 850–1 400 м/с, соответственно) и достаточно высокой температурой (4 000–5 700 К и 3 000–4 000 К). Эти характеристики определяют и высокую скорость напыляемых частиц, достигающую значений 800–1 300 м/с.

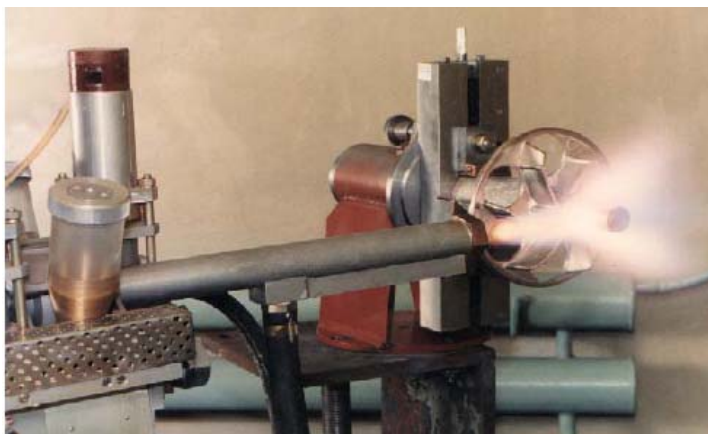
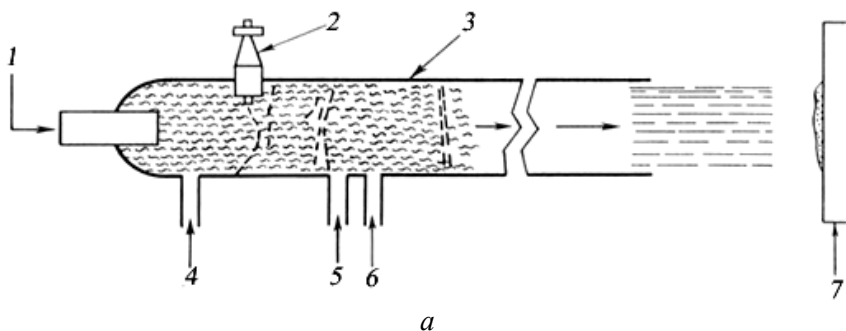


Рис. 2.19. Установка детонационного напыления:

а — схема процесса; б — внешний вид;

1 — ввод порошка; 2 — свеча зажигания; 3 — корпус установки; 4 — ввод азота;
5 — ввод ацетилена; 6 — ввод кислорода; 7 — подложка

Этот метод обеспечивает наибольшую плотность покрытий и прочность сцепления с основой, однако малопроизводителен и относительно дорог (табл. 2.2).

Сущность процесса электрометаллизации заключается в плавлении проволоки электрической дугой и распылении расплавленного металла сжатым воздухом (рис. 2.20).

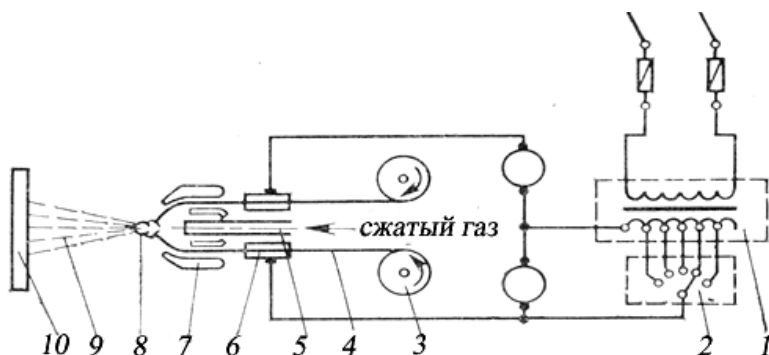


Рис. 2.20. Схема процесса электродуговой металлизации:

1, 2 – источники электроэнергии (сварочный трансформатор) с устройством для управления величиной тока; 3 – катушки; 4 – распыляемая проволока; 5 – сопло для распыляющего сжатого газа; 6 – контактные трубки; 7 – направляющие для проволок; 8 – электрическая дуга; 9 – частицы распыленного металла; 10 – напыляемое изделие

ЛИТЕРАТУРА

1. Балабанов, В. И. Нанотехнологии. Наука будущего / В. И. Балабанов. – М. : Эксмо, 2009. – 256 с.
2. Наноматериалы. Классификация, особенности свойств, применение и технологии получения : учебное пособие / Б. М. Балоян, А. Г. Колмаков, М. И. Алымов [и др.]. – М. : АгроПрессДизайн, 2007. – 102 с.
3. Головин, Ю. И. Введение в нанотехнологию / Ю. И. Головин. – М. : Машиностроение, 2003. – 112 с.
4. Дьячков, П. Н. Углеродные нанотрубки: строение, свойства, применение / П. Н. Дьячков. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2006. – 293 с.
5. Кобаяси, Н. Введение в нанотехнологию / Н. Кобаяси. – М. : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. – 134 с.
6. Витязь, П. А. Основы нанотехнологий и наноматериалов / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич. – Минск : Вышэйшая школа, 2010. – 302 с.
7. Наноматериалы и нанотехнологии / В. М. Анищик [и др.]. – Минск : издательство БГУ, 2008. – 375 с.
8. Витязь, П. А. Наноматериаловедение : учебное пособие для студентов учреждений высшего образования по техническим специальностям / П. А. Витязь, Н. А. Свидуневич, Д. В. Куис. – Минск : Вышэйшая школа, 2015. – 510 с.
9. Наноматериалы и нанотехнологии : учебник для вузов / Е. И. Пряхин, К. А. Кыдралиева, А. В. Метелица [и др.]. – М : Лань, 2023. – 372 с.
10. Андриевский, Р. А. Наноматериалы на металлической основе в экстремальных условиях : учебное пособие. – М. : Машиностроение, 2016. – 102 с.
11. Свойства и сферы применения : учебник для вузов / Г. И. Джардималиева, К. А. Кыдралиева, А. В. Метелица [и др.]. – М. : Лань, 2021. – 200 с.
12. Соколов, И. О. Технология упрочнения тяжело нагруженных деталей газотермическим напылением / И. О. Соколов, Н. В. Спиридонов, М. В. Нерода. – Барановичи : РИО БарГУ, 2012. – 184 с.

13. Коробов Ю. С. Анализ свойств газотермических покрытий : в 2 ч. / Ю. С. Коробов. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2016. – Ч. 2 : Оценка параметров покрытий. – 2016. – 92 с.
14. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование / А. Ф. Ильющенко, А. И. Шевцов, В. А. Оковитый [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2011. – 357 с.
15. Даровской, Г. В. Технологические методы восстановления и повышения износостойкости деталей подвижного состава : учебно-методическое пособие к курсовому проектированию / Г. В. Даровской. – Ростов н/Д : ФГБОУ ВО РГУПС, 2017. – 47 с.
16. Блюменштейн, В. Ю. Восстановление и упрочнение деталей машин : учебное пособие для студентов специальности 151001 «Технология машиностроения» / В. Ю. Блюменштейн, М. С. Махалов, В. В. Слизников. – Кемерово : КузГТУ, 2011. – 126 с.
17. Мрочек, Ж. А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин : учебное пособие / Ж. А. Мрочек, Л. М. Кожуро, И. П. Филонов. – Минск : УП «Технопринт», 2000. – 268 с.
18. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко, В. С. Ивашко, С. А. Клименко [и др.]. – Минск : Беларуская навука, 2013. – 463 с.
19. Повышение работоспособности деталей рабочих органов сельскохозяйственных машин : монография / И. Н. Шило, Г. Ф. Бетеля, Л. А. Маринич [и др.]. – Минск : Белорусский государственный аграрный технический университет, 2010. – 320 с.
20. Витязь, П. А. Упрочнение газотермических покрытий : монография / П. А. Витязь, Р. О. Азизов, М. А. Белоцерковский. – Минск : Бестпринт, 2004. – 192 с.
21. Белый, А. В. Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота / А. В. Белый, В. А. Кукареко, А. Патеюк. – Минск : Беларуская навука, 2007. – 244 с.
22. Белоцерковский, М. А. Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий / М. А. Белоцерковский. – Минск : Технопринт, 2004. – 200 с.
23. Павлов, А. Ю. Основы газотермического напыления защитных покрытий / А. Ю. Павлов, В. В. Овчинников, А. Д. Шляпин. – Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 300 с.

24. Ельцов, В. В. Восстановление и упрочнение деталей машин : учебное пособие / Тольятти : Издательство ТГУ, 2015. – 316 с.

25. Беляев, Е. С. Коррозионностойкие, упрочняющие и восстанавливающие покрытия. Общие требования и методы контроля. Методические указания к лабораторным и практическим работам. – Н. Новгород : НГТУ, 2015. – 11 с.

26. Газотермическое напыление : учебное пособие / Л. Х. Балдаев, В. Н. Борисов, В. А. Вахалин [и др.]. – М. : Маркет Д. С, 2007. – 344 с.

27. Газодинамическое напыление: Структура и свойства покрытий / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондаврский, Г. В. Москвитин [и др.]. – М. : КРАСАНД, 2017. – 240 с.

28. Бороненков, В. Н. Основы дуговой металлизации / В. Н. Бороненков, Ю. С. Коробов. – Екатеринбург : Издательство Уральского университета, 2012. – 258 с.

Учебное издание

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ.
ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ
НА МАТЕРИАЛЫ**

Пособие

для обучающихся, получающих углубленное
высшее образование (магистрантов) по специальности
7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»

С о с т а в и т е л ь

БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ Марат Артемович

Редактор *А. С. Быховцова*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 13.06.2025. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 4,88. Уч.-изд. л. 4,03. Тираж 100. Заказ 696.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.