

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ  
Белорусский национальный технический университет

---

«Технология машиностроения»

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Пособие

для обучающихся по специальности

7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»,  
профилизация «Аддитивные и субтрактивные технологии»

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

Минск  
БНТУ  
2026

УДК 620.22-027.3+621-03:001.895(075.8)

ББК 34.43я7

П27

С о с т а в и т е л и:

*И. В. Фомихина, В. К. Шелег*

Р е ц е н з е н т ы:

кафедра «Технология металлов» УО «Белорусский  
государственный аграрный технический университет»

(д-р техн. наук, профессор *Л. М. Акулович*);

начальник отделения технологий машиностроения и металлургии

Объединенного института машиностроения НАН Беларуси,

д-р техн. наук, профессор *В. И. Жорник*

**Перспективы** создания и применения новых материалов  
П27 в машиностроении: пособие для обучающихся по специальности  
7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»,  
профилизация «Аддитивные и субтрактивные технологии» / сост.:  
И. В. Фомихина, В. К. Шелег. – Мн.: БНТУ, 2026. – 113 с.

ISBN 978-985-31-0201-7.

Рассмотрены перспективные направления создания новых материалов в машиностроении, включающие инновационные, аддитивные и информационные технологии. Показаны достоинства применения металлов и сплавов с особыми свойствами, керамических и композиционных материалов, наноматериалов, функциональных порошковых материалов, сверхтвердых материалов и покрытий для обеспечения социально-экономического развития Республики Беларусь.

Пособие предназначено для обучающихся по специальности 7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении», профилизация «Аддитивные и субтрактивные технологии», а также может быть использовано учащимися колледжей машиностроительных специальностей.

УДК 620.22-027.3+621-03:001.895(075.8)

ББК 34.43я7

ISBN 978-985-31-0201-7

© Белорусский национальный  
технический университет, 2026

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
Раздел 1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ .....	6
1.1. Инновационные технологии в современном машиностроении .....	6
1.2. Аддитивные технологии и аддитивное производство .....	12
1.3. Применение информационных технологий .....	17
Раздел 2. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ .....	20
2.1. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами .....	20
2.2. Сплавы с памятью формы .....	24
2.3. Радиационно-стойкие материалы .....	26
2.4. Аморфные металлические сплавы .....	27
2.5. Сверхпроводящие материалы .....	30
2.6. Материалы со специальными магнитными свойствами .....	32
Раздел 3. КЕРАМИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	35
3.1. Керамические материалы .....	35
3.2. Композиционные материалы .....	41
3.2.1. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы .....	43
3.2.2. Волокнистые композиционные материалы .....	45
3.2.3. Слоистые композиционные материалы .....	47
Раздел 4. НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	51
4.1. Классификация наноматериалов .....	51
4.2. Углеродные наноматериалы .....	55
4.2.1. Фуллерены .....	57
4.2.2. Нанотрубки .....	57
4.2.3. Графен .....	58
4.3. Применение нанотехнологий .....	59
Раздел 5. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ .....	61
5.1. Конструкционные порошковые материалы .....	61
5.2. Пористые порошковые материалы .....	65

5.2.1. Антифрикционные материалы .....	66
5.2.2. Фрикционные материалы .....	71
5.2.3. Фильтрующие материалы.....	74
5.2.4. Тепловые трубы.....	78
5.2.5. Высокпористые пеноматериалы .....	80
5.3. Электротехнические порошковые материалы.....	80
5.3.1. Контактные электротехнические материалы.....	81
5.3.2. Магнитные электротехнические материалы.....	83
5.3.3. Аморфные магнитоматериалы .....	86
5.4. Порошковые материалы для ядерной энергетики.....	87
Раздел 6. СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ .....	89
6.1. Синтетические сверхтвердые материалы.....	89
6.1.1. Алмазы и алмазные инструменты.....	89
6.1.2. Кубический нитрид бора .....	91
6.2. Покрытия для инструментов из СТМ.....	95
6.2.1. Металлические и композиционные покрытия.....	95
6.2.2. Неметаллические покрытия.....	97
Раздел 7. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ .....	100
7.1. Классификация процессов нанесения металлических покрытий.....	100
7.2. Металлические покрытия .....	102
7.3. Неметаллические покрытия.....	105
7.3.1. Неорганические покрытия.....	105
7.3.2. Органические полимерные покрытия .....	105
ЛИТЕРАТУРА .....	111

## ВВЕДЕНИЕ

Машиностроение является основой развития технологического ядра всей отечественной промышленности и экономики страны. Роль и значение машиностроения определяется, прежде всего, тем, что это базовая отрасль экономики, тесно взаимосвязанная со всеми другими ведущими отраслями и обеспечивающая их устойчивое функционирование, наполнение потребительского рынка. От уровня развития машиностроения в первую очередь зависят важнейшие удельные показатели валового внутреннего продукта страны (материалоемкость, энергоемкость и т. д.), производительность труда практически во всех отраслях народного хозяйства, уровень экологической безопасности промышленного производства и обороноспособность государства. В республике функционируют такие крупные предприятия, как ОАО «БелАЗ», ОАО «Минский тракторный завод», ОАО ПО «Гомсельмаш», ОАО «Белкоммунмаш», ОАО «Амкодор» и многие другие, продукция которых уже успела стать известной на мировом рынке. Республика Беларусь изготавливает грузовые автомобили, автобусы, спецтехнику, а также сельскохозяйственные машины. Деятельность машиностроительного комплекса формирует внутренний валовый продукт Республики Беларусь и является движущей силой экономики, а также создания и применения новых материалов.

К задачам создания новых материалов относятся:

- производство сверхпрочных материалов;
- производство сверхтвердых материалов;
- уменьшение эффективной массы изделий;
- создание материалов, выдерживающих механические нагрузки при высоких температурах;
- чистота материалов;
- использование композиционных материалов;
- защита материалов от химического взаимодействия с окружающей средой [1];
- разработка широкого спектра функциональных наноматериалов.

Создание и применение новых материалов в машиностроении позволит повысить уровень развития отрасли и технико-экономический потенциал страны.

# **Раздел 1. ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

## **1.1. Инновационные технологии в современном машиностроении**

Важнейшими факторами социально-экономического развития Беларуси является стратегия национальной политики в отношении науки и инноваций. В условиях государственной самостоятельности, при ограниченных сырьевых и топливно-энергетических ресурсах рост эффективности национальной экономики прогнозируется на основе развития обрабатывающих отраслей промышленности и сферы услуг, для поддержания которых в конкурентоспособном состоянии необходим адекватный уровень развития научно-технического потенциала. Задача последнего состоит как в производстве новых знаний, так и в использовании достижений отечественной и мировой науки и технологий. Имеющиеся в настоящее время в стране научно-технические ресурсы – накопленные знания, научные кадры, материально-техническая база и система финансового обеспечения науки – оцениваются как достаточные стартовые условия для дальнейшего развития, которые существенно зависят от инновационной активности производственной сферы – основного потребителя результатов исследований и разработок.

Наука Беларуси остается важным фактором становления экономики страны в условиях переходного периода. С ее непосредственным участием достигается развитие наукоемких отраслей промышленности, наращивание экспортных возможностей отдельных отраслей и производств, рост качества продукции, научное обеспечение сельского хозяйства, здравоохранения, экологии.

В новых экономических условиях научно-техническая сфера существенно изменилась как по ориентации ученых и специалистов на рыночные механизмы, так и по организации самой научно-технической деятельности. Участие исследовательских коллективов и отдельных ученых в различных конкурсах на выполнение научных и научно-технических программ и проектов дало новые возможности для проявления инициативы, качественного обновления тематики, поисков потенциальных пользователей научной

продукции в стране и за рубежом, формирования новых программ и проектов, что свидетельствует о новом качестве в организации исследований.

Машиностроение является ведущей отраслью, опорой и движущей силой экономики страны, играет важную роль в социально-экономическом и интеллектуальном развитии государства и по праву считается фундаментом всего промышленного комплекса [2]. В стране работают сотни предприятий, которые производят автомобили и автокомпоненты, сельскохозяйственные машины и станки, сложные приборы, оптику, электротехническое оборудование, лифты, бытовую технику и электронику.

В производственной линейке – десятки тысяч наименований различной продукции: от микросхем до самых больших в мире карьерных самосвалов. Белорусское машиностроение обеспечивает качественную работу таких отраслей экономики, как энергетика, строительство, транспорт, агропромышленный комплекс. Заводы играют большую роль как в развитии страны в целом, так и в региональной экономике, в части обеспечения занятости населения, являясь во многих случаях градообразующими организациями. На всех континентах земного шара работает техника, созданная руками белорусских рабочих.

За 2022–2024 годы более 75 % машиностроительной продукции реализовывалось за рубеж. Тракторы ОАО «МТЗ», карьерные самосвалы ОАО «БЕЛАЗ», тягачи и автобусы ОАО «МАЗ», вагоны железнодорожные или трамвайные ЗАО «Штадлер Минск», легковые автомобили СЗАО «БЕЛДЖИ», бытовая техника ОАО «Горизонт», ОАО «Витязь», ЗАО «АТЛАНТ», лифты ОАО «Могилевлифтмаш», комбайны ОАО «Гомсельмаш», дорожно-строительная и лесозаготовительная техника ОАО «Амкор» и другая многочисленная продукция ежегодно поставляется более чем в 140 стран мира.

Инновационная деятельность машиностроительного сектора экономики рассматривается как основной механизм его восстановления и развития [1]. Инновационная деятельность включает все научные, технологические, организационные, финансовые и коммерческие мероприятия, которые фактически или по замыслу ведут к реализации инноваций, позволяет создавать более эффективные и продуктивные машины и оборудование, снизить затраты на производство

и улучшить качество продукции, сократить время на производство, улучшить точность и качество изделий, а также снизить количество брака [2, 3].

Схематическое представление инновационного процесса создания модернизированного продукта представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схематическое представление инновационного процесса создания модернизированного продукта

Благодаря новым технологиям и разработкам, компании могут предложить уникальные и инновационные продукты, которые отличаются от конкурентов.

Инновационная деятельность связана с использованием результатов фундаментальных научных исследований для разработки новой

или совершенствования существующей продукции или технологии, последующей коммерциализацией разработок и играет важную роль в достижении устойчивого развития, способствует разработке экологически чистых технологий и энергоэффективных решений, что позволяет снизить негативное воздействие производства на окружающую среду.

В целом, инновационное машиностроение является ключевым фактором развития промышленности и экономики страны. Оно способствует повышению производительности, конкурентоспособности и устойчивости отрасли, а также созданию новых возможностей для развития и прогресса.

Основными принципами инновационного машиностроения являются:

- исследование и разработка, проведение научных исследований, экспериментов и тестирование новых идей и концепций;
- креативность и инновации, поиск новых идей, подходов к решению проблем;
- сотрудничество и партнерство между инженерами, дизайнерами, производственными специалистами, учеными и предпринимателями с университетами, исследовательскими центрами и другими организациями для обмена знаниями и опытом;
- гибкость и адаптивность к изменениям и новым требованиям рынка;
- качество и надежность новых технологий и материалов;
- устойчивость и экологическая ответственность при воздействии на окружающую среду новых технологий и продуктов с минимизацией отрицательных последствий [3, 4].

Схема программно-целевого управления научно-инновационной деятельностью представлена на рис. 2.



Рис. 2. Схема программно-целевого управления научно-инновационной деятельностью

Преимущества инновационного машиностроения представлены в табл. 1.

## Преимущества инновационного машиностроения

Аспект	Преимущества	Примеры
1. Разработка и производство новых и усовершенствованных машин и оборудования	<ul style="list-style-type: none"> <li>– способствует развитию экономики и повышению конкурентоспособности;</li> <li>– позволяет создавать более эффективные и продуктивные машины;</li> <li>– способствует развитию научно-технического прогресса</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разработка новых материалов;</li> <li>– создание автоматизированных производственных линий;</li> <li>– разработка инновационных систем управления</li> </ul>
2. Развитие промышленности и повышение уровня жизни людей	<ul style="list-style-type: none"> <li>– содействует развитию новых отраслей экономики;</li> <li>– улучшает качество жизни людей;</li> <li>– способствует экологической устойчивости</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разработка энергоэффективных технологий;</li> <li>– создание машин с низким уровнем шума и вибрации;</li> <li>– разработка экологически чистых производств</li> </ul>
3. Увеличение производительности, снижение затрат на производство, улучшение качества продукции	<ul style="list-style-type: none"> <li>– повышение конкурентоспособности;</li> <li>– развитие научно-технического прогресса;</li> <li>– создание новых рабочих мест</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– внедрение роботизированных систем;</li> <li>– разработка новых материалов;</li> <li>– создание инновационных систем управления</li> </ul>
4. Разработка новых материалов, создание автоматизированных производственных линий, разработка инновационных систем управления	<ul style="list-style-type: none"> <li>– улучшение качества и надежности продукции;</li> <li>– сокращение времени производства;</li> <li>– снижение затрат на эксплуатацию</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– разработка КМ для авиационной промышленности;</li> <li>– создание роботизированных линий;</li> <li>– разработка интеллектуальных систем управления производством</li> </ul>

В качестве примеров инновационных технологий в машиностроении можно назвать:

– **3D-печать** – процесс создания трехмерных объектов путем последовательного нанесения слоев материала. В машиностроении

3D-печать используется для создания прототипов, индивидуальных деталей и даже целых изделий. Технология позволяет сократить время и затраты на проектирование и производство, а также создает возможность для более сложных и инновационных дизайнов;

– **робототехника** – область, которая объединяет машиностроение, электронику и программирование для создания автоматизированных систем. В машиностроении робототехника используется для автоматизации производственных процессов, улучшения качества и точности работы, а также для выполнения опасных или сложных задач. Например, роботы могут быть использованы для сварки, сборки, обработки материалов и т. д.;

– **интернет вещей (IoT)** – сеть физических устройств, которые могут взаимодействовать и обмениваться данными через интернет. В машиностроении используется для создания «умных» машин и оборудования, которые могут мониторить свое состояние, передавать данные о работе и получать команды удаленно;

– **нанотехнологии** – область, которая занимается изучением и использованием материалов и структур на наномасштабе (размером от 1 до 100 нанометров). В машиностроении нанотехнологии используются для создания новых материалов с улучшенными свойствами такими, как прочность, легкость, устойчивость к коррозии и теплоизоляция. Нанотехнологии могут быть применены в авиационной и автомобильной промышленности для создания более легких и прочных материалов.

## **1.2. Аддитивные технологии и аддитивное производство**

**Аддитивные технологии (Additive Manufacturing)** – метод создания трехмерных объектов, деталей или вещей путем послойного добавления материала: пластика, металла, бетона и т. д. [3].

С помощью аддитивных процессов (АП) можно послойно создавать абсолютно любые изделия на основе 3D-модели. Такая технология позволяет изготавливать детали сложной формы, которые невозможно получить методом литья или механической обработки.

**Преимущества аддитивных технологий (AT).** Аддитивные технологии в производстве металлических изделий вывели процессы на новый уровень. Они имеют множество важных преимуществ:

– объединяют несколько деталей в одно целое – использование 3D-печати позволяет уменьшить количество элементов в готовой единице за счет проектирования единого сложного компонента;

– снижают расходы – изделия изготавливаются напрямую без применения оснастки;

– дают возможность производить детали сложной формы – к примеру, в них можно создавать внутренние каналы для охлаждения или скрытые элементы, изготавливать тонкие стенки или мелкую сетку;

– легко интегрируются – АТ можно интегрировать в имеющиеся технологические процессы для их усовершенствования и уменьшения количества выполняемых операций [4];

– быстрота изготовления – традиционными способами сложную деталь производят в течение месяцев, а с 3D-печатью ее можно сделать за несколько часов. После изготовления часто не нужна дополнительная механическая обработка;

– безотходное производство – в традиционном производстве велик риск отправить неверно изготовленную деталь в отходы. При использовании аддитивных методов, если металлическая деталь не получилась, ее можно вновь превратить в порошок и из него опять напечатать то же изделие;

– отсутствие швов и сварных соединений – в отличие от традиционного производства, с помощью аддитивных технологий можно получить изделия с уникальными свойствами, без швов и стыков. Такие объекты невозможно изготовить с помощью сварки и штамповки;

– отсутствие ограничений, которые свойственны обычным технологиям удаления припуска и литья.

**Направления применения аддитивных технологий.** В зависимости от конечного результата выделяют:

– **изготовление деталей** (*Rapid Patterns*) для использования в качестве шаблонов для конечного изделия;

– **изготовление пресс-форм** (*Rapid Tooling*) для формовки и литья изделий;

– **прямое цифровое производство** (*Direct Digital Manufacturing, DDM*) – изготовление аддитивными способами конечного продукта.

**Виды аддитивных технологий.** Методы 3D-производства разделяются на несколько видов в зависимости от используемого материала и технологии его формирования в готовое изделие (для создания

металлических деталей используют послойное расплавление и порошковую плавку; исходный материал находится в виде порошка):

**1. Технология послойного расплавления (рис. 3).** Аддитивные системы состоят из рабочей платформы, резервуара для материала, а также механизма формирования и выравнивания слоя. Толщина последнего может варьироваться в пределах 20–100 мкм. Когда слой сформирован, луч с высокой плотностью энергии плавит порошок по заданному контуру, оставляя нетронутыми остальные части. Изготовление металлических изделий таким методом получило название **SLM-технология** – лазерное плавление порошка по CAD-моделям с использованием иттербиевого лазера.

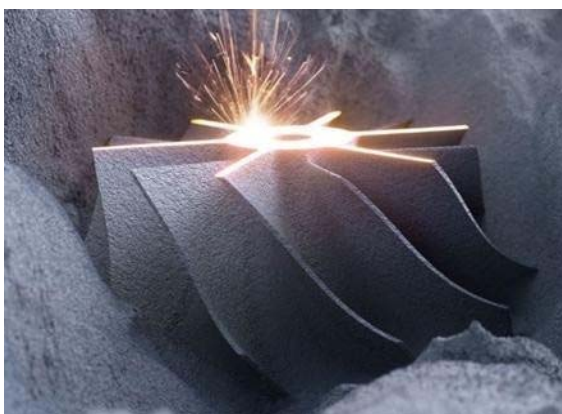


Рис. 3. Изготовление металлических изделий методом SLM-технологии – лазерного плавления порошка по CAD-моделям

**2. Порошковая наплавка.** Хотя для изготовления деталей используется такой же порошок, как и в предыдущем случае, этот метод аддитивных технологий имеет некоторые отличия. Материал подается через специальное сопло и расплавляется под лазерным излучением на поверхности изготавливаемой детали. Наплавка характеризуется повышенной точностью, с ее помощью можно производить изделия толщиной от 0,1 мм до нескольких сантиметров. Она может использоваться как для изготовления новых металлических элементов, так и для реставрации поврежденных.

**3. Прямое нанесение металла по технологии DMD.** DMD-технология сочетает пять направлений: лазерное воздействие, CAD, CAM, сенсоры и порошковую металлургию. Компьютер управляет форсунками и оптикой, которые перемещают лазерный луч по траекториям движения инструмента, заданным в соответствии с заранее подготовленной 3D-моделью. Лазер фокусируется на заготовке, а порошок через форсунку выбрасывается в зону расплава. Луч движется в соответствии со схемой, послойно наращивая металлическое изделие.

**Общие этапы производства 3D-изделий:**

1. **3D-моделирование** или создание эскиза изделия (Computer Aided Design или CAD).

2. **Создание уменьшенной копии** изделия из более дешевого материала, например, недорогого пластика вместо металла.

3. **Печать** самого изделия после того, как копия прошла проверку. Принтер, следуя эскизу, добавляет слои жидкости, порошка или листового материала и изготавливает деталь, иногда всего за несколько часов.

Ажурный шарик из титана невозможно создать традиционными способами (рис. 4). У него отсутствуют стыки и швы, он обладает упругостью и отскакивает от пола, как мяч [4].

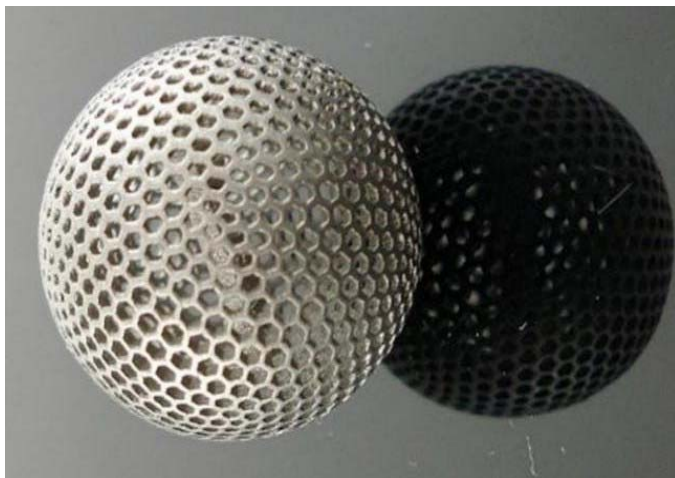


Рис. 4. Ажурный шарик из титана, полученный методом 3D-печати

### **Самые популярные методы изготовления 3D-изделий:**

– **лазерная стереолитография** (*Stereolithography, LSA*) – самая первая технология 3D-печати, когда модели изготавливаются из жидких фотополимерных смол с помощью ультрафиолетового лазера или его аналога [3];

– **послойное наплавление** (*Fused Deposition Modeling, FDM*) – самая простая и распространенная технология. Она поддерживается всеми программами для проектирования. Трехмерный объект «выращивается» из нагретой пластиковой нити. Недорогие домашние 3D-принтеры обычно работают на этой технологии;

– **селективное лазерное плавление** (*Selective Laser Melting, SLM*) – самый распространенный метод 3D-печати металлом. Используя порошки из стали, титана, алюминия или других металлов, можно изготовить геометрически сложные изделия, детали машин и двигателей для промышленности.

На рис. 5 представлен винт из металлического порошка, напечатанный на 3D-принтере [4].

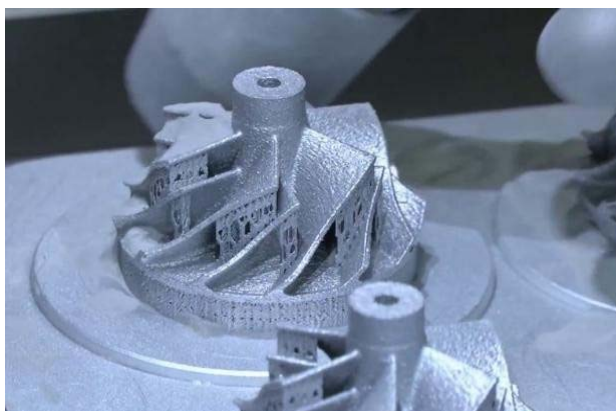


Рис. 5. Винт из металлического порошка, напечатанный на 3D-принтере

### ***Применение аддитивных технологий в машиностроении.***

Аддитивные технологии активно используются в промышленности. В 1989 году компания BMW начала применять их одной из первых. В то время термин «3D-печать» еще не использовался. В 2018 году предприятие открыло специализированный центр аддитивного производства в Мюнхене и изготавливает там прототипы, сверхслож-

ные элементы шасси и уже не выпускаемые серийно детали для классических автомобилей (рис. 6) [4].



Рис. 6. Напечатанная на 3D-принтере крыльчатка помпы для автомобиля BMW гоночной серии

Сейчас и другие автомобильные компании выпускают автомобили, полностью или частично сделанные аддитивными методами. Качественные детали, сертификационные требования к которым очень высоки, востребованы также в авиационной и космической промышленности. Компания Boeing уже изготовила методами аддитивных технологий более 20 000 деталей для своих самолетов. Компания Siemens Power утверждает, что именно 3D-печать позволила им достичь значительного прорыва в производстве электрооборудования. Используя аддитивные технологии, они получают прототипы продукции на 90 % быстрее, чем раньше – с высокой степенью эффективности, высоким КПД и низкой стоимостью [4].

### 1.3. Применение информационных технологий

**Информационные технологии** – это процессы создания, хранения, обмена информацией, а также способы реализации этих процессов [4–6].

**Примерами информационных технологий** являются:

- веб-технологии;
- технологии обработки графической информации;

- сетевые технологии;
- мультимедийные технологии;
- презентационные технологии;
- технология работы с электронными таблицами;
- технология работы с базами данных;
- технология обработки графической информации;
- технология обработки текстовой информации.

**Основными принципами** современных информационных технологий являются:

- интерактивный (диалоговый) режим работы с компьютером;
- интегрированность (взаимосвязь) с другими программными продуктами;
- гибкость процесса изменения как данных, так и постановок задач.

Структура информационной технологии представлена на рис. 7.



Рис. 7. Структура информационной технологии

**Структуру информационных технологий** образуют:

– **техническое обеспечение** – персональный компьютер, оргтехника, линии связи, оборудование сетей;

– **программное обеспечение** – совокупность программ, исполняемых аппаратными средствами компьютера, позволяющих обрабатывать информацию на ЭВМ;

– **информационное обеспечение** – совокупность данных, представленных в определенной форме для компьютерной обработки;

– **организационно-методическое обеспечение** – комплекс мероприятий, направленных на функционирование компьютера и программного обеспечения для получения искомого результата.

**Современная информационная технология** – это технология, основанная на:

– повсеместном использовании ЭВМ и оргтехники (технические средства, используемых в целях механизации и автоматизации управленческих и инженерно-технических работ; например, использование пишущих машинок, механизированных картотек, копировальных аппаратов, микрокалькуляторов и пр.);

– активном участии пользователей в информационных процессах;

– высоком уровне дружественного пользовательского интерфейса;

– широком использовании пакетов прикладных программ общего и специального назначения;

– возможности для пользователя доступа к базам данных и программам, в том числе и удаленным, благодаря локальным и глобальным компьютерным сетям;

– анализе ситуаций при выработке и принятии управленческих решений с помощью автоматизированных рабочих мест специалистов;

– применении систем искусственного интеллекта;

– внедрении экспертных систем;

– использовании телекоммуникации и др.

## Раздел 2. МЕТАЛЛЫ И СПЛАВЫ С ОСОБЫМИ СВОЙСТВАМИ

### 2.1. Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами

Для ряда отраслей машиностроения и приборостроения необходимо применение материалов со строго регламентированными значениями в определенных температурных интервалах эксплуатации таких физических свойств, как температурные коэффициенты линейного расширения  $\alpha$  (ТКЛР) и модуля нормальной упругости. Эти коэффициенты определяют характер изменения размеров детали и модуля упругости сплава при нагреве [8].

*Сплавы с регламентируемым температурным коэффициентом линейного расширения (ТКЛР)* [5]. ТКЛР – относительное изменение линейных размеров тела, происходящее в результате изменения его температуры на 1 град при постоянном давлении. На рис. 8 представлена схема удлинения образца при нагреве и формула расчета ТКЛР.

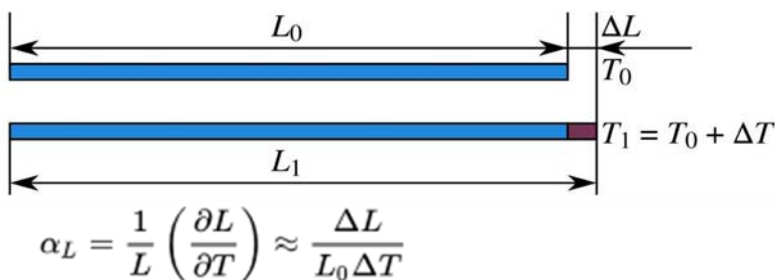


Рис. 8. Схема удлинения образца при нагреве и формула расчета ТКЛР

ТКЛР должен обязательно учитываться при решении инженерных задач, связанных с проектированием и расчетом ответственных и наукоемких деталей и узлов, работающих в широком диапазоне температур. Тепловое расширение металлов необходимо учитывать при ковке, горячей объемной штамповке, сварке изделий, прокладке трубопроводов и рельсов железнодорожных путей, соединении мостовых ферм и других металлических конструкций. Наибольшие

значения этого показателя присущи: цинку ( $35 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ), алюминию ( $25 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ), свинцу ( $29 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ) и магнию ( $25 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ). Наименьший коэффициент температурного линейного расширения имеют специальные сплавы: инвар 36 (64 % Fe – 36 % Ni) / 36Н9 ( $1,6 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ) и Ковар (54 % Fe – 29 % Ni – 17 % Co) / 29НК ( $5 \cdot 10^{-6}$  град $^{-1}$ ).

Основным представителем сплавов с минимальным ТКЛР является сплав 36Н. Инвар имеет самые низкие значения  $\alpha$  в интервале температур от  $-100$  до  $+100$  °С. Благодаря высокому уровню механических свойств и технологичности инвар используется в качестве конструкционного материала для деталей, от которых требуется постоянство размеров при меняющихся температурных условиях эксплуатации [6].

Состав и свойства Fe–Ni сплавов с регламентированным ТКЛР представлены в табл. 2 [7].

Таблица 2

Состав и свойства Fe–Ni сплавов с регламентированным ТКЛР

Название сплава	Марка сплава	Массовая доля элементов, %			Тепловые свойства	
		Ni	Co	Cu	$T, ^\circ\text{C}$	$\alpha \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$
Инвар	36Н	35–37	–	–	20–80	1,5
Суперинвар	32НКД	31,5–33	3,3–4,2	0,6–0,8	20–100	1,0
Ковар	29НК	28,5–29,5	17–18	–	20–400	4,5–5,2
Платинит	47НД	46–48	–	4,5–5,5	20–400	9,2–10

Из инвара изготавливают жесткозакрепленные трубопроводы сложной пространственной формы, перекачивающие сжиженные газы в криогенных установках. Малая величина ТКЛР позволяет уменьшить напряжения в трубопроводах и предотвратить возможность их разрушения. Содержание углерода в сплавах инварного состава не должно превышать 0,05 % [5].

Ковар применяют для соединения с термостойкими стеклами, а платинит – с обычными легкоплавкими стеклами, применяемыми в электровакуумной промышленности.

**Термобиметаллы.** Стали с определенным тепловым расширением служат также для изготовления термобиметаллов, когда слой с низким тепловым расширением («пассивный слой») путем прокатки надежно соединяют с другим слоем, обладающим более высоким тепловым расширением («активный слой»).

Биметаллические пластины используют в качестве терморегулятора в приборостроении. Нагрев такой пластинки приводит к ее искривлению, позволяющему замкнуть электрическую цепь. Основным свойством термобиметаллов является термочувствительность, т. е. способность изгибаться при изменении температуры. В качестве пассивной составляющей обычно применяют инвар 36Н с ТКЛР =  $1,5 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, а в качестве активной – Fe–Ni сплавы с ТКЛР около  $20 \cdot 10^{-6}$  град<sup>-1</sup>, содержащие 8–27 % Ni, дополнительно легированные Cr, Mn, Mo [6].

**Сплавы с особыми упругими свойствами.** Модуль упругости (МУ) – это единица измерения отношения напряжения, создаваемого в материале, к линейной деформации, такой, как растяжение и сжатие:  $\varepsilon = \sigma/E$ .

**Типы модулей упругости стали:**

1. Модуль Юнга ( $E$ ): определяет сопротивление материала растяжению или сжатию при упругой деформации. Нередко обозначается как модуль упругости.

2. Модуль сдвига ( $G$ ): характеризует способность материала сопротивляться изменению формы при сохранении объема.

3. Модуль объемной упругости ( $K$ ): определяет способность объекта изменять объем под воздействием всестороннего нормального напряжения.

Сплавы с заданными свойствами упругости, помимо низких значений МУ, должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и релаксационной стойкостью в условиях статического и циклического нагружения. Уровень МУ чистого железоникелевого сплава даже при небольших колебаниях концентрации никеля, неизбежных в сталеплавильном производстве, становится нестабильным и претерпевает значительные изменения. Легирование хромом повышает стабильность сплава. Элинвар, содержащий 36 % Ni и 12 % Cr, характеризуется такими же значениями МУ, как и чистый Fe–Ni сплав, но менее зависящими от возможных откло-

нений в концентрации никеля. Однако он имеет более низкие механические свойства, которые нельзя улучшить термической обработкой из-за стабильности аустенитной структуры. Кроме того, температура Кюри (температура, при превышении которой магнитные материалы теряют свои ферромагнитные свойства, заменяясь парамагнетизмом) этого сплава составляет около 100 °С, что ограничивает температурный интервал его применения. Для повышения температуры Кюри в элинварах увеличивают концентрацию никеля, а для улучшения механических свойств элинвары дополнительно легируют титаном, алюминием или бериллием и подвергают двойной закалке 900–950 °С в воду и старению при 600–700 °С в течение 4 ч. Состав и свойства элинварных сплавов представлены в табл. 3 [5].

Таблица 3

Состав и свойства элинварных сплавов

Марка сплава	Массовая доля элементов, %, остальное – железо				МУ, Е, ГПа	ТКЛР, $\alpha \cdot 10^{-6}$ град <sup>-1</sup>	$T_{\text{эксп}}$ , °С
42НХТЮ	41,5–43,5	5,3–5,9	2,4–3,0	0,5–1,0	177–186	9,5	От –269 до +100
44НХТЮ	43,5–45,5	5,0–5,6	2,2–2,7	0,4–0,8	177–181	8,0	От –269 до +200
30Н25КТЮ*	29,5–30,5	–	2,7–3,0	0,5–1,0	–	–	От –269 до +400

\*Данный сплав содержит 25,5–26,5 % Со.

Элинварные дисперсионно-твердеющие сплавы типа 42НХТЮ, 44НХТЮ применяют для изготовления упругих чувствительных элементов прецизионных приборов: расходомеров, регуляторов скорости и датчиков линейных ускорений, динамометров электронных весов, волосковых спиралей часовых механизмов. Сплав 30Н25КТЮ относится к элинварам с наиболее высокой точкой Кюри (470 °С). Благодаря этому он сохраняет температурную стабильность упругих свойств и релаксационной стойкости вплоть до 400 °С.

## 2.2. Сплавы с памятью формы

Наиболее перспективными для практического применения являются сплавы Ti–Ni эквиатомного состава (примерно 50:50 % (ат.)), обычно называемые никелидом титана или нитинолом [5–8]. Реже используют более дешевые сплавы на основе меди Cu–Al–Ni и Cu–Al–Zn. Эффект памяти формы состоит в том, что образец, имеющий определенную форму в аустенитном состоянии при повышенной температуре, деформируют при более низкой температуре мартенситного превращения. После перегрева, сопровождающегося протеканием обратного превращения, исходная характерная форма восстанавливается. Эффект памяти формы (ЭПФ) проявляется в сплавах, характеризующихся термоупругим мартенситным превращением, когерентностью решеток исходной аустенитной и мартенситной фаз, сравнительно небольшой величиной гистерезиса превращения, а также малыми изменениями объема при превращениях. В никелиде титана объемные изменения составляют около 0,34 %, что на порядок меньше, чем в сталях (около 4 %) [5]. Эффект памяти формы – явление возврата к первоначальной форме при нагреве, которое наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации [8]. Физический смысл явления ЭПФ заключается в следующем (рис. 9):

1. В исходном состоянии в материале существует определенная структура (на рис. 9 обозначена правильными квадратами).

2. При деформации внешние слои материала вытягиваются, а внутренние сжимаются. В материалах с памятью формы мартенсит является термоупругим.

3. При нагреве начинает проявляться термоупругость мартенситных пластин, то есть в них возникают внутренние напряжения, которые стремятся вернуть структуру в исходное состояние.

4. Поскольку внешние вытянутые пластины сжимаются, а внутренние сплюснутые растягиваются, материал в целом проводит автодеформацию в обратную сторону и восстанавливает свою исходную структуру, а вместе с ней и форму [8].

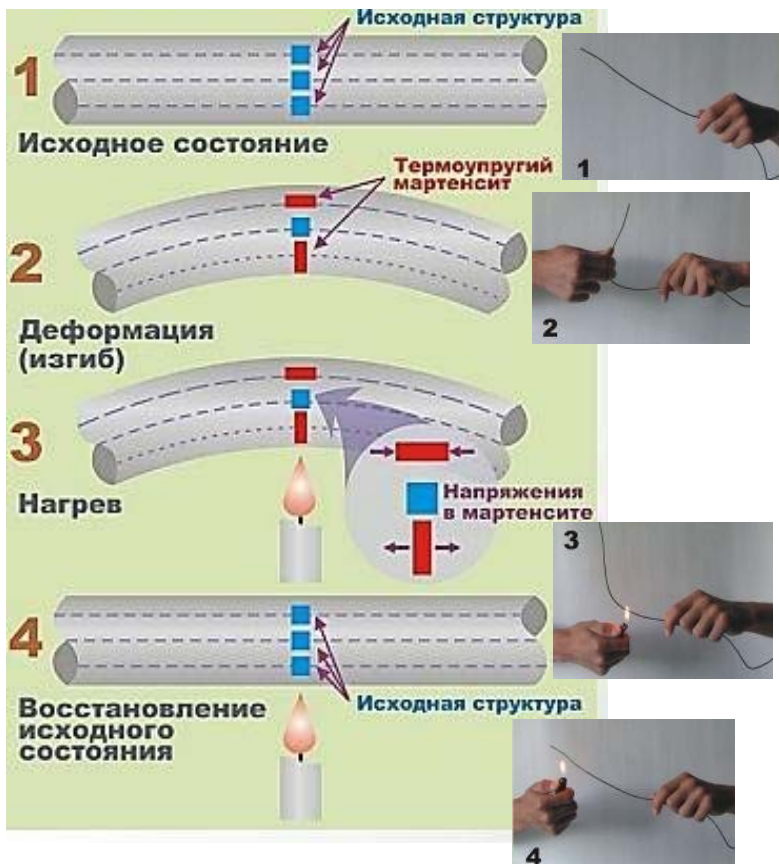


Рис. 9. Физический смысл ЭПФ

### Явления, связанные с ЭПФ:

**Сверхпластичность** – состояние материала, имеющего кристаллическую структуру, которое допускает деформации, на порядок превышающие максимально возможные для этого материала в обычном состоянии.

**Сверхупругость** – свойство материала, подвергнутого нагрузке до напряжения, значительно превышающего предел текучести, полностью восстанавливать первоначальную форму после снятия нагрузки. Наблюдается в области температур между началом прямого мартенситного превращения и концом обратного (рис. 10) [9].

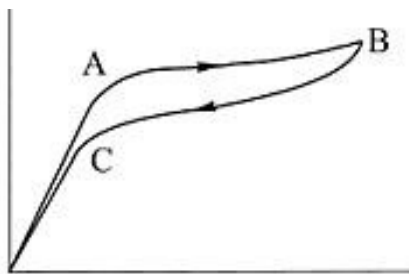


Рис. 10. Сверхупругое механическое поведение на основе сплава Ti–Ni

На участке АВ пластическая деформация обусловлена протеканием реакции «аустенит – мартенсит», инициируемой механическим нагружением. Наведенный в данных условиях мартенсит термодинамически неустойчив и при снятии нагрузки превращается в аустенит, что сопровождается исчезновением пластической деформации (участок ВС).

Значение сверхупругой деформации может составлять для разных сплавов от 2 до 8 %, что позволяет изготавливать из сплавов с ЭПФ упругие элементы с существенно более высокими деформационными способностями (например, суперпружины).

### 2.3. Радиационно-стойкие материалы

**Радиационная стойкость материалов** (твердых) – способность материалов сохранять свойства (механические, электрические, оптические и др.) при воздействии радиации. Изменение свойств обусловлено смещениями атомов в кристаллической решетке ядерными реакциями, разрывами химических связей и др. Изменения могут быть обратимыми и необратимыми. Последние обусловлены преимущественно химическими превращениями молекул.

Свойства кристаллов чувствительны к повреждениям кристаллической решетки. Одиночные дефекты обычно упрочняют металл, но снижают его пластичность. Электросопротивление металлов или сплавов возрастает за счет образования дефектов, хотя в сплавах возможно уменьшение электросопротивления, если радиационное воздействие приводит к упорядочению структуры. В полупроводниках под действием облучения концентрация точечных *дефектов* увеличивается, что приводит к изменению электрических и оптических свойств.

Конструкционные материалы под действием облучения испытывают структурные превращения, оказывающие отрицательное влияние, в первую очередь, на механические свойства и коррозионную стойкость. Из всех видов облучения (нейтроны,  $\alpha$ - и  $\beta$ -частицы,  $\gamma$ -излучение) наиболее сильное влияние оказывает нейтронное облучение.

Радиационно-стойкими материалами называют материалы, сохраняющие стабильность структуры и свойств в условиях нейтронного облучения.

Нержавеющие аустенитные стали под влиянием нейтронного воздействия претерпевают существенные структурно-фазовые изменения, которые при определенных дозах облучения приводят не только к катастрофическому снижению механических свойств материала, но и к потере коррозионной стойкости. В большинстве случаев наблюдается проявление локальных видов коррозии, в частности, коррозионное растрескивание, межкристаллитная и питтинговая коррозия. Скорость коррозии сплавов на основе алюминия в водной среде в условиях облучения возрастает в 2–3 раза. Наблюдается радиационное распухание сталей под действием облучения.

Распухание можно подавить путем структурно-принудительной рекомбинации металлов за счет непрерывного распада твердого раствора с образующейся вторичной фазой на границе матрицы. Возникающие при распаде сильные поля структурных напряжений способствуют рекомбинации радиационных дефектов и существенно снижают распухание. Развитое дисперсионное твердение является способом подавления радиационного распухания. Радиационная стойкость реакторных материалов может быть достигнута при выполнении комплекса условий. К ним относятся оптимальные химический состав и структура материалов, условия их эксплуатации: уровни рабочей температуры, нейтронного потока и свойства коррозионной среды [5].

## **2.4. Аморфные металлические сплавы**

Металлы, имеющие аморфную структуру, имеют так называемый ближний порядок расположения атомов. Кристаллическая же структура, характерная для большинства металлов, повторяется во всем объеме вещества (дальний порядок). При аморфном состоянии

металла его атомы располагаются упорядоченно лишь на близких расстояниях. Схожая структура характерна для обычного стекла.

Основным методом получения аморфных металлов является сверхбыстрое охлаждение расплавленного вещества, при котором не успевает происходить процесс кристаллизации. Металл переходит в твердое состояние, сохраняя структуру, аналогичную расплавленной фазе. Необходимость максимально быстрого охлаждения всего объема расплава обусловила получение аморфных металлов в виде тонких листов, ленты, проволоки или порошка. Для сохранения в аморфном состоянии объемных металлических изделий используются специальные сплавы, имеющие малую критическую скорость охлаждения.

**Свойства аморфных материалов.** Аморфные материалы обладают следующими механическими свойствами:

- повышенной устойчивостью к коррозии;
- высоким уровнем прочности и твердости;
- высоким уровнем вязкости [10].

Затвердевание с образованием аморфной структуры принципиально возможно для всех металлов и сплавов. Для практического применения обычно используют сплавы переходных металлов (Fe, Co, Mn, Cr, Ni и др.), в которые для образования аморфной структуры добавляют аморфообразующие элементы (B, C, Si, P, S). Такие аморфные сплавы обычно содержат около 80 % (ат.) одного или нескольких переходных металлов и 20 % металлоидов, добавляемых для образования и стабилизации аморфной структуры. Аморфизаторы понижают температуру плавления и обеспечивают достаточно быстрое охлаждение расплава ниже его температуры стеклования так, чтобы в результате образовалась аморфная фаза [5].

Аморфные металлы являются высокопрочными материалами. Это объясняется тем, что пластическая деформация происходит в узко (10–40 нм) локализованных полосах сдвига, а за пределами этих полос деформация практически не имеет развития, что и приводит к низким значениям макроскопической пластичности при растяжении. Предел текучести аморфных сплавов  $Fe_{40}Ni_{40}P_{14}B_6$ ,  $Fe_{80}B_{20}$ ,  $Fe_{60}Cr_6Mo_6V_{28}$  составляет соответственно 2 400, 3 600, 4 500 МПа, в то время как предел текучести высокопрочных сталей обычно составляет не более 2 500 МПа.

**Применение аморфных материалов.** Аморфные материалы используют для армирования труб высокого давления, изготовления

металлокорда шин и др. В перспективе возможно применение аморфных сплавов для изготовления маховиков. Высокая прочность в сочетании с коррозионной стойкостью позволяют использовать аморфные сплавы для изготовления кабелей, работающих в контакте с морской водой, а также изделий, условия эксплуатации которых связаны с воздействием агрессивных сред. Из аморфной ленты изготавливают предметы бытового назначения: бритвенные лезвия, рулетки и др. Аморфные высокоуглеродистые стали, содержащие Cr, Mo, W, обладают высоким сопротивлением разрушению и термической стабильностью: например,  $Fe_{54}Cr_{16}Mo_{12}C_{18}$  имеет предел прочности при растяжении 3 800 МПа и температуру кристаллизации 610 °С. При этом такие высокоуглеродистые сплавы имеют высокие коррозионные характеристики и нечувствительны к охрупчиванию при старении. Такие сплавы целесообразно использовать в высокопрочных композитах [6].

Плотность аморфных материалов на 1–2 % ниже кристаллических аналогов, прочность выше в 5–10 раз. Электрическое сопротивление аморфных материалов в 3–5 раз выше, чем у кристаллических аналогов. Аморфные материалы почти всегда являются магнитомягкими ферромагнетиками. Уменьшение магнитной анизотропии у аморфных материалов приводит к резкому снижению коэрцитивного поля, что уменьшает потери при перемагничивании.

Свойства и применение аморфных металлических материалов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Свойства и применение аморфных металлических материалов

Состав сплава	Свойства	Применение
$Fe_{75}Si_{10}B_{15}$	Высокая прочность, высокая вязкость	Проволока, армирующие материалы, пружины, режущий инструмент
$Fe_{45}Cr_{25}Mo_{10}P_{13}C_7$	Высокая коррозионная стойкость	Электродные материалы, фильтры для работ в растворах кислот, морской воде, сточных водах

Состав сплава	Свойства	Применение
$\text{Fe}_{81}\text{B}_{13}\text{Si}_4\text{C}_2$	Высокая магнитная индукция насыщения, низкие потери	Сердечники трансформаторов, преобразователи, дроссели
$\text{Fe}_5\text{Co}_{70}\text{Si}_{10}\text{B}_{15}$	Высокая магнитная проницаемость, низкая коэрцитивная сила	Магнитные головки и экраны, магнетометры, сигнальные устройства
$\text{Fe}_{83}\text{B}_{17}$	Постоянство модулей упругости и температурного коэффициента линейного расширения	Инварные и элинварные материалы

Несмотря на то, что аморфные металлы обладают особыми свойствами, которые не встречаются у кристаллических металлов, они имеют свои недостатки:

- невысокая термическая устойчивость;
- недостаточная стабильность во времени, что снижает их надежность;
- полная несвариваемость – аморфные металлы не пригодны для крупногабаритных конструкций, невозможность их использования в качестве высокотемпературных материалов [3].

## 2.5. Сверхпроводящие материалы

Сверхпроводники – это удивительные материалы, обладающие способностью проводить электрический ток без какого-либо сопротивления (рис. 11). Сверхпроводник – материал, **электрическое сопротивление которого при понижении температуры до некоторой величины  $T_c$  становится равным нулю (сверхпроводимость)** [5–8].

С понижением температуры наблюдается монотонное падение электросопротивления. Вблизи абсолютного нуля у многих металлов и сплавов происходит резкое падение электросопротивления, и они становятся сверхпроводниками.



Рис. 11. Сверхпроводящие материалы (электрические кабели)

Сверхпроводимость – способность материалов не оказывать сопротивления электрическому току при температурах ниже характерной для них критической температуры  $T_{кр}$ . Из всех чистых металлов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, наивысшую критическую температуру перехода имеет ниобий ( $T_{кр} = 9,2$  К). Однако для ниобия характерны низкие значения критического магнитного поля (около 0,24 Тл), что недостаточно для его широкого применения. Хорошим сочетанием критических параметров  $T_{к}$  и  $B_{к}$  отличаются сплавы и интерметаллидные соединения ниобия с цирконием, титаном, оловом и германием: Nb–Zr, Nb–Ni, Nb<sub>3</sub>Sn, Nb<sub>3</sub>Al<sub>1-x</sub>Ge<sub>x</sub>, Nb<sub>3</sub>Ge, V<sub>3</sub>Ga [6].

Сверхпроводимость – квантовое явление. Оно характеризуется эффектом Мейснера, заключающемся в полном вытеснении магнитного поля из объема сверхпроводника при критической температуре.

#### **Применение сверхпроводимости:**

1. Наиболее важными областями применения сверхпроводников является создание сильных магнитных полей, получение и передача электроэнергии в электрических кабелях и линиях электропередач (ЛЭП).

2. Сверхпроводящие магниты используют для исследований в области физики высоких энергий, создания мощных магнитных кольцевых ускорителей частиц и систем управления движением пучков частиц на выходе из ускорителя.

3. Сверхпроводимость позволяет также решить проблему запаса электроэнергии впрок с выдачей ее при пиковых нагрузках. Индуктивный накопитель энергии представляет собой тороидальный криостат диаметром несколько метров, по виткам обмотки которого практически без потерь циркулирует ток.

4. Явление сверхпроводимости используется в маглеве (поезде на магнитной подушке).

## 2.6. Материалы со специальными магнитными свойствами

К материалам со специальными магнитными свойствами относятся сплавы с большой магнитострикцией и термомагнитные сплавы. Сплавы с большой магнитострикцией используют в ультразвуковой и гидроакустической аппаратуре для изготовления излучателей, ультразвуковых преобразователей энергии, линий задержки в электрических цепях и электромеханических фильтров. Применение каждого магнитострикционного сплава определяется комплексом магнитных и механических свойств, а также сохранением этого комплекса во всем интервале рабочих температур.

**Магнитные композиты** [5] – это материалы, которые состоят из мелких частиц ферромагнетиков или ферримагнетиков и связующей среды. Связующая среда может быть раствором природной или синтетической смолы или гранулятом, который твердеет при нагревании. Магнитные композиты могут быть гибкими, твердыми, жидкими или полупроводниковыми. Одним из первых магнитных композитов было так называемое высокочастотное железо. Магнитные свойства композитов зависят от типа магнитного порошка, который используется в их составе [8, 9]. Чаще всего применяются ферритовые порошки и материалы на основе редкоземельных элементов.

Магнитные композиты можно разделить на две группы:

1. Смеси, в которых органический компонент играет только роль связующего вещества. К этой группе относятся *магнитожесткие ферриты*, смешанные с пластиком. Бакелитовый феррит – это маг-

нитотвердый феррит, смешанный с формальдегидной смолой. Полиэтиленовый феррит (пефер) – это смесь разветвленного полиэтилена и мелкодисперсной ферритовой пыли.

2. Композиты, в которых содержание смолы существенно влияет на свойства всего материала. Это так называемый **магнитный каучук**. В него добавляют порошок, который имеет свойства постоянного магнита. Это позволяет изготавливать тонкие магниты и магниты сложной формы. Магнитные композиты находят широкое применение в различных областях. Например, они используются для магнитных замков, магнитных резиновых уплотнений в холодильниках, мембран динамиков, магнитов для коррекции цвета на цветных экранах, магнитных переключателей, магнитных муфт, роторов и статоров малых электродвигателей, а также в магнитных лаках и клеях для магнитных слоев на магнитных лентах и т. д.

Кроме того, магнитные композиты могут быть использованы для создания новых функциональных материалов, таких как:

1. **Магнитные жидкости**, которые представляют собой коллоидные растворы магнитных частиц в немагнитной жидкости.

2. **Магнитные полимеры**, которые представляют собой полимерные материалы, содержащие магнитные частицы или молекулы.

3. **Магнитные композиты с гигантским магнитосопротивлением**. Композиты, состоящие из магнитных и немагнитных слоев.

4. **Магнитострикционные материалы**.

**Магнитострикционные материалы** – это материалы, которые изменяют свои линейные размеры при намагничивании.

**Магнитострикционные ферриты для резонаторов** – поликристаллические соединения на основе железа и других металлов, которые имеют высокую магнитную проницаемость и низкие потери.

**Магнитострикционные ферриты для преобразователей** – поликристаллические соединения на основе железа и других металлов, которые имеют высокую магнитострикцию и низкую коэрцитивную силу.

**Магнитострикционные сплавы на основе никеля и железа** – металлические сплавы, которые имеют высокую намагниченность и магнитострикцию. Они могут быть изготовлены в виде листов, проволоки или порошка. Используются в качестве датчиков положения, механических деформаций, температуры, магнитного поля и других физических величин.

**Магнитострикционные сплавы на основе редкоземельных металлов** – интерметаллические соединения, которые имеют гигантские значения магнитострикции, достигающие  $10^{-3}$ – $10^{-4}$ . Обладают высокой намагниченностью и твердостью.

Используются в качестве высокоэффективных преобразователей энергии, например, в микроактуаторах, микронасосах, микрогромкоговорителях и т. д.

#### **5. Термомагнитные материалы.**

К ним относятся такие магнитные материалы (ферромагнитные сплавы), у которых наблюдается резко выраженная температурная зависимость намагниченности в заданном магнитном поле. Это свойство проявляется в определенном интервале температур вблизи точек Кюри, значения которых у термомагнитных материалов находятся между 0 и 200 °С. Известны следующие основные группы термомагнитных сплавов: медно-никелевые (30–40 % Cu), железоникелевые (30 % Ni) и железоникелевые (30–38 % Ni), легированные Cr (до 14 %), Al (до 1,5 %), Mn (до 2 %).

Медно-никелевые сплавы могут применяться в области температур от –50 до 80 °С. Недостаток этих сплавов – сравнительно низкие значения намагниченности. Железоникелевые сплавы предназначены для работы при температурах от 20 до 80 °С [11]. При отрицательных температурах в этих сплавах возможно изменение кристаллической структуры, сопровождающееся повышением точки Кюри и снижением температурного коэффициента намагниченности. Наибольшее распространение получили легированные железоникелевые сплавы. В зависимости от состава они могут применяться в разных температурных областях: узкой (от –20 до 35 °С) либо широкой (от –60 до 170 °С). На базе легированных железоникелевых сплавов создаются многослойные термомагнитные материалы, имеющие улучшенные магнитные характеристики [10, 11].

## Раздел 3. КЕРАМИЧЕСКИЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 3.1. Керамические материалы

Перспективность керамики обусловлена исключительным многообразием ее свойств по сравнению с другими типами материалов, доступностью сырья, низкой энергоемкостью технологий, долговечностью керамических конструкций в агрессивных средах [10–12].

*По структуре керамику можно подразделить:*

- на кристаллическую, которая характеризуется упаковкой образующих ее атомов в один из видов кристаллической решетки (шпинели, перовскиты, гранаты);
- аморфную (стекла), которая характеризуется ближним порядком;
- композиты, которые состоят из отдельных (разнородных) фаз, отличающихся составом, структурой и свойствами.

Характеристика основных видов керамики представлена в табл. 5.

Таблица 5

Характеристика основных видов керамики [5]

Функциональный тип	Свойства	Применение	Соединения
1	2	3	4
Электрокерамика	Электропроводимость, электроизоляционные, диэлектрические и пьезоэлектрические свойства	Интегральные схемы, конденсаторы, вибраторы, зажигатели, нагреватели, термисторы, транзисторы, фильтры, солнечные батареи, твердые электролиты	$\text{BeO}$ , $\text{MgO}$ , $\text{Y}_2\text{O}_3$ , $\text{ZnO}$ , $\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{ZrO}_2$ , $\text{SiC}$ , $\text{B}_4\text{C}$ , $\text{TiC}$ , $\text{CdS}$ , $\text{Si}_3\text{N}_4$ , титанаты
Магнетокерамика	Магнитные свойства	Головки магнитной записи, магнитные носители, магниты	Магнитомягкие и магнитотвердые ферриты
Оптокерамика	Прозрачность, поляризация, флуоресценция	Лампы высокого давления, ИК-прозрачные окна, лазерные материалы, световоды, элементы оптической памяти, экраны дисплеев	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , $\text{MgO}$ , $\text{Y}_2\text{O}_3$ , $\text{SiO}_2$ , $\text{ZrO}_2$ , $\text{ZnS}$ , $\text{CdS}$

1	2	3	4
Термо-керамика	Жаропрочность, жаростойкость, огнеупорность, теплопроводность, коэффициент термического расширения, теплоемкость	Огнеупоры, тепловые трубы, футеровка реакторов, электроды для металлургии, теплообменники, теплозащита	SiC, TiC, B <sub>4</sub> C, NiB <sub>2</sub> , ZrB <sub>2</sub> , Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , BeS, CeS, BeO, MgO, ZrO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO
Механо-керамика	Твердость, прочность, модуль упругости, вязкость разрушения, износостойкость, триботехнические свойства, КТР, термостойкость	Керамика для тепловых двигателей, уплотнительная, антифрикционная и фрикционная керамики, режущий инструмент, пресс-инструмент, направляющие и др. износостойкие детали	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , ZrO <sub>2</sub> , SiC, TiB <sub>2</sub> , ZnB <sub>2</sub> , TiC, TiN, WC, B <sub>4</sub> C, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , BN, Композиты [5]
Сверхпроводящая керамика	Электропроводимость	Линии электропередач, накопители энергии, поезда на магнитной подушке, электромобили	La–Ba–Cu–O La–Sr–Cu–O Y–Ba–Cu–O

Основными разработчиками и производителями керамических материалов являются США и Япония. Принципиальными недостатками керамики являются ее хрупкость и сложность обработки. Керамические материалы плохо работают в условиях механических или термических ударов, а также при циклических условиях нагружения. Им свойственна высокая чувствительность к надрезам. В то же время керамические материалы обладают высокой жаропрочностью, превосходной коррозионной стойкостью и малой теплопроводностью, что позволяет с успехом использовать их в качестве элементов тепловой защиты. При температурах выше 1000 °С керамика прочнее любых сплавов, в том числе и суперсплавов, а ее сопротивление ползучести и жаропрочность выше. В современном машиностроении применение керамики постоянно увеличивается.

К основным областям применения керамических материалов относятся:

1. **Керамика в станкостроении** – важным качеством является нечувствительность к воздействию влажности, коррозии, магнитных полей. Фирмой «Тото» (Toto, Япония) выпускаются из керамики мерительные угольники, линейки, калибры, точность которых достигает долей микрометра. Срок службы их в 2–30 раз больше, чем у инструментов, изготовленных из чугуна, стали, гранита.

2. **Режущий керамический инструмент** – характеризуется высокой твердостью, в том числе при нагреве, износостойкостью, химической инертностью к большинству металлов в процессе резания. По комплексу этих свойств керамика существенно превосходит традиционные режущие материалы – быстрорежущие стали и твердые сплавы. Режущие керамические пластины используются для оснащения различных фрез, токарных резцов, расточных головок, специального инструмента. Минералокерамика (или **режущая керамика**) – инструментальный материал на основе оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ) или карбида кремния ( $SiC$ ) [5], обладающий большими, чем у твердых сплавов, твердостью и теплостойкостью, но меньшей ударной вязкостью. Основные преимущества режущей керамики по сравнению с твердыми сплавами заключаются в практически неограниченных сырьевых ресурсах (алюмосиликаты составляют до 50 % массы земной коры).

**Выпускаются четыре основные группы режущей керамики:**

1) **оксидная** (белая керамика) на основе  $Al_2O_3$  для точения заготовок из ферритных ковких чугунов и незакаленных конструкционных сталей при скоростях резания свыше 250 м/мин;

2) **оксидно-карбидная** (черная керамика) на основе композиции  $Al_2O_3-TiC$  для обработки ковких, высокопрочных, отбеленных, модифицированных чугунов, закаленных сталей (до 65 HRC);

3) **оксидно-нитридная** на основе  $Al_2O_3-TiN$  рекомендуется для обработки меди, закаленной стали, отбеленных чугунов, сплавов на основе никеля;

4) **нитридная керамика** на основе  $Si_3N_4$ . Для обработки чугунов и отожженных конструкционных и инструментальных сталей. Уступает в скорости резания оксидной керамике при обработке сплавов на основе алюминия и закаленной стали. При обработке серого чугуна силинит уступает нитриду бора.

**Вискеризированная керамика** – оксидная керамика армированная кристаллами карбида кремния  $SiC$ , обладающая гораздо большей прочностью по сравнению с другими типами керамики.

Вискеризованная керамика представляет собой композиционный материал, в котором оксид алюминия  $Al_2O_3$  это основа, а SiC наполнитель. Армированная керамика в основном применяется для черновой обработки жаропрочных сплавов. Режущая керамика обеспечивает скорости резания порядка 900–1000 м/мин.

Для изготовления режущего инструмента широко применяется керамика на основе оксида алюминия с добавками диоксида циркония, карбидов и нитридов титана, а также на основе бескислородных соединений – нитрида бора с кубической решеткой ( $\beta$ -BN), обычно называемого кубическим нитридом бора, и нитрида кремния  $Si_3N_4$ . Режущие элементы на основе кубического нитрида бора в зависимости от технологии получения, выпускаемые под названиями эльбор, боразон, композит 09 и др., имеют твердость, близкую к твердости алмазного инструмента, и сохраняют устойчивость к нагреву на воздухе до 1 300–1 400 °С. В отличие от алмазного инструмента кубический нитрид бора химически инертен по отношению к сплавам на основе железа. Его можно использовать для чернового и чистового точения закаленных сталей и чугунов практически любой твердости. Режущие керамические пластины используются для оснащения различных фрез, токарных резцов, расточных головок, специального инструмента [12].

### 3. *Керамика специального назначения:*

– **контейнеры для хранения радиоактивных отходов** – одним из сдерживающих факторов развития ядерной энергетики является сложность захоронения радиоактивных отходов. Благодаря малой пористости керамика характеризуется сильной поглощающей способностью по отношению к ядерным частицам. Для изготовления контейнеров применяют керамику на основе оксидов  $V_2O_5$  и карбидов бора  $B_4C$  в смеси с оксидами свинца  $PbO$  или соединениями типа  $2PbO \cdot PbSO_4$ . После спекания такие смеси образуют плотную керамику с малой пористостью. Она характеризуется сильной поглощающей способностью по отношению к ядерным частицам – нейтронам и  $\gamma$ -квантам;

– **ударопрочная броневая керамика** – по своей природе керамические материалы являются хрупкими. Важными свойствами керамических материалов, обусловившими их применение в качестве брони, являются высокие показатели твердости, модуля упругости, а также температура плавления (разложения) в 2–3 раза меньшей

плотности. К ударопрочной керамике относятся: горячепрессованный карбид бора  $B_4C$ , горячепрессованный диборид титана  $TiB$ , карбид кремния  $SiC$ , спеченный оксид алюминия  $Al_2O_3$  [12]. Сохранение прочности при нагреве позволяет использовать керамику для защиты от бронепрожигающих снарядов [13];

– **керамика в ракетно-космическом машиностроении** – при полете в плотных слоях атмосферы головные части ракет, космических кораблей, кораблей многоразового использования, нагреваемые до высокой температуры, нуждаются в надежной теплозащите. Материалы для тепловой защиты должны обладать высокой теплостойкостью и прочностью в сочетании с минимальными значениями коэффициента термического расширения, теплопроводности и плотности [14].

4. Способность керамических материалов противостоять износу в условиях гидро- и абразивного воздействия, а также коррозионная стойкость к агрессивным жидкостям обусловили применение керамики **для деталей химического и нефтяного машиностроения.**

5. Керамические материалы **в сельскохозяйственном машиностроении** используются для изготовления рабочих органов почвообрабатывающих машин.

6. Керамические материалы **в текстильном машиностроении** используются для изготовления нитепроводников.

7. Керамика для **бумагоделательного машиностроения** используется для изготовления износостойких обезвоживающих элементов бумагоделательного оборудования.

8. Из керамики изготавливают **детали газотурбинных и дизельных двигателей.** Уже сейчас для улучшения качества и свойств выпускаемой продукции, ведущие машиностроительные предприятия применяют компоненты из керамики, заменяя классические материалы керамическими. По сравнению с обычными изделиями из металла или пластмассы керамические детали демонстрируют малый вес, высокую прочность и экологическую безопасность. Конструкционная керамика допускает применение более высоких температур по сравнению с металлом и поэтому является перспективным материалом для двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных двигателей. Помимо более высокого КПД двигателей за счет повышения рабочей температуры преимуществом керамики является низкая плотность и теплопроводность, повышенная термо- и износостойкость. Кроме того, при ее использовании снижаются или от-

падают расходы на систему охлаждения. Вместе с тем следует отметить, что в технологии изготовления керамических двигателей остается ряд нерешенных проблем. К ним, прежде всего, относятся проблемы обеспечения надежности, стойкости к термическим ударам, разработки методов соединения керамических деталей с металлическими и пластмассовыми. Наиболее эффективно применение керамики для изготовления дизельных адиабатных поршневых двигателей, имеющих керамическую изоляцию, и высокотемпературных газотурбинных двигателей. Конструкционные материалы адиабатных двигателей должны быть устойчивы в области рабочих температур 1 300–1 500 град К, иметь прочность при изгибе  $\sigma_{изг}$  не менее 800 МПа и коэффициент интенсивности напряжений не менее  $8 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$ . Этим требованиям в наибольшей мере удовлетворяют керамики на основе диоксида циркония  $\text{ZrO}_2$  и нитрида кремния.

Конструкционной керамике для газотурбинных двигателей, в отличие от адиабатного двигателя, не требуется низкая теплопроводность. Учитывая, что керамические детали газотурбинных двигателей работают при более высоких температурах, они должны сохранять прочность на уровне 600 МПа при температурах до 1 200–1 400 °С (в перспективе до 1 500–1 650 °С) при пластической деформации не более 1 % за 500 ч работы. В качестве материала для таких ответственных деталей газотурбинных двигателей, как камера сгорания, детали клапанов, ротор турбокомпрессора, статор, используют нитриды и карбиды кремния, имеющие высокую теплостойкость. Повышение тактико-технических характеристик авиационных двигателей невозможно без применения керамических материалов.

На рис. 12 представлены детали из технической керамики.



Рис. 12. Техническая керамика

### 3.2. Композиционные материалы

Композиционным материалом (КМ), или композитом, называют объемную гетерогенную систему, состоящую из сильно различающихся по свойствам, взаимно нерастворимых компонентов, строение которой позволяет использовать преимущества каждого из них [5]. КМ состоят из сравнительно пластичного матричного материала (основы) и более твердых и прочных компонентов, являющихся наполнителями. Свойства КМ зависят от свойств основы, наполнителей и прочности связи между ними. Матрица связывает композицию в монолит, придает ей форму и служит для передачи внешних нагрузок арматуре из наполнителей. В зависимости от материала основы различают КМ с металлической матрицей, или металлические композиционные материалы (МКМ), с полимерной – полимерные композиционные материалы (ПКМ) и с керамической – керамические композиционные материалы (ККМ), с углеродной матрицей (рис. 13) [11].



Рис. 13. Классификация КМ по материалу основы матрицы

Ведущую роль в упрочнении КМ играют наполнители, часто называемые упрочнителями. Они имеют высокую прочность, твердость и модуль упругости. По типу упрочняющих наполнителей КМ подразделяют на дисперсно-упрочненные, волокнистые и слоистые (рис. 14) [11].



Рис. 14. Классификация КМ по виду наполнителя

Схемы строения КМ представлены на рис. 15.

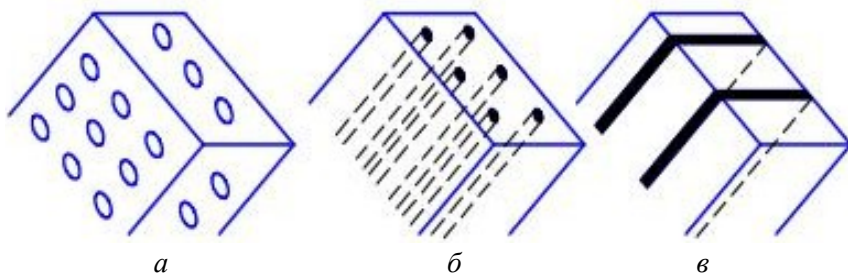


Рис. 15. Схемы строения КМ:  
*а* – дисперсно-упрочненные; *б* – волокнистые; *в* – слоистые [11]

В дисперсно-упрочненные КМ искусственно вводят мелкие равномерно распределенные тугоплавкие частицы карбидов, оксидов, нитридов и др., не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояние между ними, тем прочнее КМ. В отличие от волокнистых, в дисперсно-упрочненных КМ основным несущим элементом является матрица. Дисперсно-упрочненные КМ отличаются высокой жаропрочностью и сопротивлением ползучести.

### *3.2.1. Дисперсно-упрочненные композиционные материалы*

Наполнителями служат дисперсные частицы тугоплавких фаз – оксидов, нитридов, боридов, карбидов ( $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , BN, SiC и др.) [11].

Достоинства соединений:

- высокий модуль упругости;
- низкая плотность;
- пассивность к взаимодействию с материалами матриц;
- распространенность в природе;
- невысокая стоимость.

При дисперсном упрочнении частицы блокируют процессы скольжения в матрице. Эффективность упрочнения при условии минимального взаимодействия с матрицей зависит от вида частиц, их объемной концентрации, а также от равномерности распределения в матрице. Применяют дисперсные частицы тугоплавких фаз типа  $Al_2O_3$ ,  $SiO_2$ , BN, SiC, имеющие малую плотность и высокий модуль упругости. КМ обычно получают методом порошковой металлургии, важным преимуществом которого является изотропность свойств в различных направлениях. В промышленности обычно применяют дисперсно-упрочненные КМ на алюминиевой (реже на никелевой) основе.

Характерными представителями этого вида композиционных материалов являются материалы типа САП (спеченная алюминиевая пудра), которые состоят из алюминиевой матрицы, упрочненной дисперсными частицами оксида алюминия. Алюминиевый порошок получают распылением расплавленного металла с последующим измельчением в шаровых мельницах до размера около 1 мкм в при-

сутствии кислорода. С увеличением длительности помола пудра становится мельче и в ней повышается содержание оксида алюминия [7]. Материалы типа САП обладают высокой жаропрочностью и превосходят все деформируемые алюминиевые сплавы. Даже при температуре 500 °С они имеют  $\sigma_b$  не менее 60–110 МПа. Жаропрочность объясняется тормозящим действием дисперсных частиц на процесс рекристаллизации [13].

Материал САП характеризуется:

- высокой прочностью;
- жаропрочностью;
- коррозионной стойкостью;
- термической стабильностью свойств.

Сплавы типа САП применяют в авиационной технике для изготовления деталей с высокой удельной прочностью и коррозионной стойкостью, работающих при температурах до 300–500 °С. Из них изготавливают штоки поршней, лопатки компрессоров, оболочки тепловыделяющих элементов и трубы теплообменников.

**Синтегран – синтетический гранит.** Используется для изготовления инструмента, высокоточных фрезерных и круглошлифовальных станков, ответственных измерительных деталей, оснасток специального назначения (рис. 16) [5]. Он является безальтернативной основой в производстве станин для расточных, шлифовальных станков, нуждающихся в особой точности и функционирующих при высокочастотных колебаниях. Материал пришел на смену чугунных отливок и модифицированного бетона.

Основными составляющими являются:

- полимерное связующее – напрямую влияет на физические и механические свойства композита, основными компонентами выступают смола и отвердитель;
- минеральные наполнители – мелкодисперсные порошки (размер до 10 мкм);
- заполнители (щебень габбро-диабазы) – размеры зерен 6,3–20 мм, количество и размеры влияют на прочность.



Рис. 16. Синтегран, используемый в производстве станин

### ***3.2.2. Волокнистые композиционные материалы***

Армирование волокнистых КМ может осуществляться по одноосной, двухосной и трехосной схеме. Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку. Армирование дает бóльший прирост прочности, но дисперсное упрочнение технологически легче осуществимо. Арматурой в волокнистых КМ могут быть волокна различной формы: нити, ленты, сетки разного плетения (рис. 17). Прочность и жесткость таких материалов определяется свойствами армирующих волокон, воспринимающих основную нагрузку [5].

Основная особенность волокнистых композитов – это возможность создания из них материалов и изделий с заданными свойствами, наиболее полно отвечающими характеру и условиям работы деталей

и конструкций. Используя разные матрицы и меняя в них содержание армированных волокон, их ориентацию в слоях материала, сочетая в одной матрице волокна с различными упруго-прочностными свойствами, можно создавать материалы с заданным комплексом свойств.

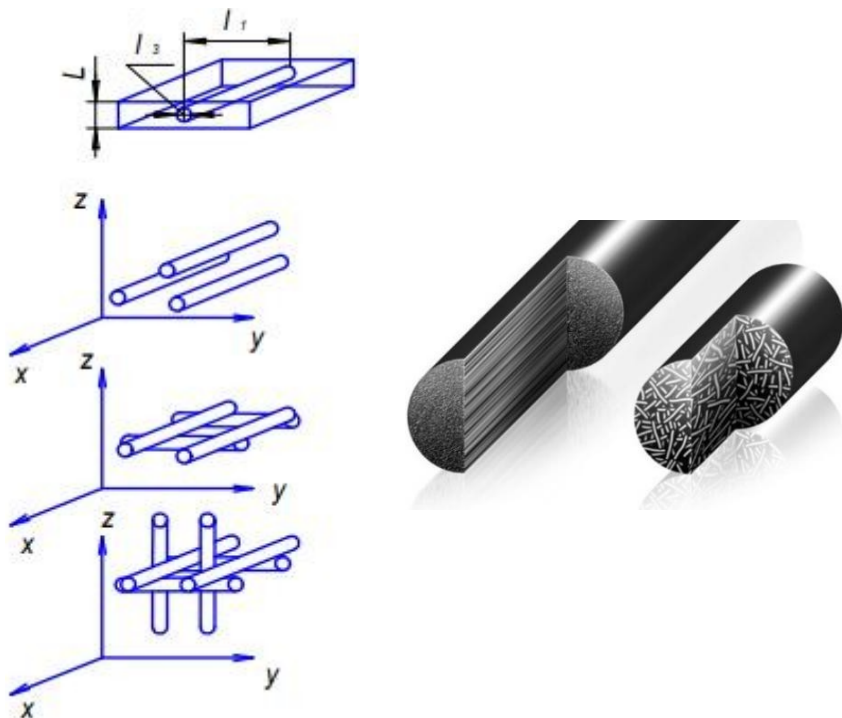


Рис. 17. Армирование волокнистых КМ

**Углепластики** – композиционные полимерные материалы, армированные наполнителями из углеродных волокон в виде нитей, ленты, тканей. Углепластик (карбон) – это композиционный многослойный материал, представляющий собой полотно из углеродных волокон в оболочке из термореактивных полимерных (чаще эпоксидных) смол (рис. 18). Углепластики характеризуются низкой плотностью, высокой прочностью, вибропрочностью, повышенной химической стойкостью, практически нулевым коэффициентом линейного расширения.



Рис. 18. Изделия из углепластика

Углеродные волокна получают из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т. д. [12].

Углепластики используются как конструкционные материалы в авиакосмической технике, автомобилестроении, судостроении, машиностроении, медицинской технике.

***Бороалюминий и КМ на основе алюминиевой матрицы.*** Промышленное применение нашел материал ВКА-1, содержащий 50 % непрерывных высокопрочных волокон бора в матрице алюминия. По модулю упругости и теплостойкости бороалюминиевые композиты превосходят все высокопрочные алюминиевые сплавы. Бор мало разупрочняется с повышением температуры, поэтому композиты сохраняют высокую прочность до 400–500 °С [12]. Высокая демпфирующая способность материала обеспечивает вибропрочность изготовленных из него конструкций [12]. Композиционные материалы с борными волокнами (боропластик, бороалюминий) широко используются в авиации и ракетно-космической технике. Из них делают крупные детали для космических кораблей.

### ***3.2.3. Слоистые композиционные материалы***

Слоистые композиционные материалы набираются из чередующихся слоев наполнителя и матричного материала (типа «сэндвич»). Слои наполнителя в таких КМ могут иметь различную ориентацию. Возможно поочередное использование слоев наполнителя из разных материалов с разными механическими свойствами (рис. 19).

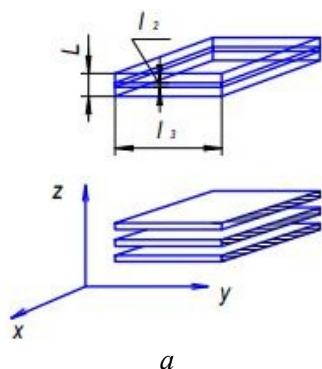


Рис. 19. Слоистые КМ:  
*a* – схематическое изображение; *б* – ламинат

Для слоистых композиций обычно используют неметаллические материалы [14]. В слоистых КМ матрица и наполнитель расположены слоями, как, например, в триплексах, фанере, клееных деревянных конструкциях и слоистых пластиках.

Классификация слоистых КМ по способу применения представлена на рис. 20.



Рис. 20. Классификация слоистых КМ по способу применения

**Сэндвич-панели.** Основные слоистые композиционные структуры ориентированы на выпуск монослойной пеноалюминиевой продукции и сэндвич-панелей. Под сэндвич-панелями понимается материал с двумя плакирующими поверхностями металлом и пенометаллическим слоем посередине (рис. 21).



Рис. 21. Пеноалюминиевые панели

Сэндвич-панели из алюминиевой пены разработаны для обеспечения прочности и защиты.

Алюминиевая пена обладает следующими свойствами:

1. **Акустическое поглощение:** сквозная структура алюминиевой пены может эффективно поглощать энергию звуковой волны. Звуковая волна будет отражаться и рассеиваться много раз после входа в сквозные отверстия, так что энергия звуковой волны будет постепенно преобразовываться в тепловую энергию, таким образом реализуя эффект поглощения звука. Размер и распределение сквозных отверстий могут регулировать частотный диапазон и эффективность поглощения звука.

2. **Легкий вес и высокая прочность:** алюминиевая пена легкая с относительно низкой плотностью, в то время как ее основа из алюминиевого сплава придает ей высокую прочность и жесткость. Это позволяет алюминиевой пене достигать акустических характеристик без увеличения нагрузки и веса материала.

3. **Коррозионная стойкость:** алюминиевые сплавы обладают хорошей коррозионной стойкостью и могут стабильно использоваться в течение длительного времени во влажных и коррозионных средах. Это делает алюминиевую пену пригодной для акустических применений в широком диапазоне условий окружающей среды.

4. Пластичность и обрабатываемость: алюминиевая пена обладает хорошей пластичностью и обрабатываемостью, ее можно резать, формовать и обрабатывать по мере необходимости. Это делает ее пригодной для изготовления акустических компонентов различных форм и размеров.

**Применение:** акустическая пена из алюминия со сквозными ячейками широко используется в звукопоглощающих панелях, шумозащитных барьерах и устройствах контроля шума. Она широко используется в строительстве, автомобилестроении, аэрокосмической промышленности, производстве электронного оборудования и других отраслях для снижения передачи шума и обеспечения благоприятной акустической среды.

## Раздел 4. НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

### 4.1. Классификация наноматериалов

**Нанотехнология** – наука и техника создания, изготовления, характеристики и реализации материалов и функциональных структур и устройств на атомном, молекулярном и нанометровом уровнях.

**Наноматериалы** – материалы, созданные с использованием наночастиц или посредством нанотехнологий, обладающие какими-либо уникальными свойствами, обусловленными присутствием этих частиц в материале [15].

**По назначению наноматериалы делят на:**

- функциональные;
- композиционные;
- конструкционные.

**По количеству измерений:**

- нульмерные/квазинульмерные (квантовые точки, сфероидные наночастицы);
- одномерные/квазиодномерные (квантовые проводники, нанотрубки);
- двумерные/квазидвумерные (тонкие пленки, поверхности разделов);
- трехмерные/квазитрехмерные (многослойные структуры с наноразмерными дислокациями, сверхрешетки, нанокластеры).

Согласно рекомендации 7-й Международной конференции по нанотехнологиям (Висбаден, 2004 г.), **выделяют следующие типы наноматериалов (рис. 22):**

- нанопористые структуры;
- наночастицы;
- нанотрубки и нановолокна и наноленты;
- нанодисперсии (коллоиды);
- наноструктурированные поверхности и пленки;
- нанокристаллы и нанокластеры [15].

В настоящее время отсутствует единая терминология и классификация наноматериалов в зависимости от размера частиц, но с недавних пор стали различать геометрическую и физическую размерность наночастиц. Наноматериалы можно также подразделить на четыре категории (рис. 23) [16].



Рис. 22. Типы наноматериалов

*Первая категория (наноизделия)* включает материалы в виде твердых тел, размеры которых в одном, двух или трех пространственных координатах не превышают 100 нм. К таким материалам можно отнести наноразмерные частицы (нанопорошки), нанопроволоки и нановолокна, очень тонкие пленки (толщиной менее 100 нм), нанотрубки и т. п. Такие материалы могут содержать от одного структурного элемента или кристаллита (для частиц порошка) до нескольких их слоев (для пленки). В связи с этим первую категорию можно классифицировать как наноматериалы с малым числом структурных элементов или наноматериалы в виде наноизделий [16].

*Вторая категория (микроизделия)* включает в себя материалы в виде малоразмерных изделий с характеризующим размером в примерном диапазоне от 1 мкм до 1 мм. Обычно это проволоки, ленты, фольги. Такие материалы можно классифицировать как наноматериалы с большим числом структурных элементов (кристаллитов) или наноматериалы в виде микроизделий [16].



Рис. 23. Классификация наноматериалов

*Третья категория (массивные наноматериалы)* представляет собой массивные (или, иначе, объемные) наноматериалы с размерами изделий из них в макродиапазоне (более нескольких миллиметров). Такие материалы состоят из очень большого числа наноразмерных элементов (кристаллитов) и фактически являются поликристаллическими материалами с размером зерна 1–100 нм. В свою очередь третью категорию наноматериалов можно разделить на два класса.

В первый класс входят однофазные материалы (в соответствии с терминологией – микроструктурно однородные материалы), структура и/или химический состав которых изменяются по объему мате-

риала только на атомном уровне. Их структура, как правило, находится в состоянии, далеком от равновесия. К таким материалам относятся, например, стекла, гели, пересыщенные твердые растворы. Ко второму классу можно отнести микроструктурно неоднородные материалы, которые состоят из наноразмерных элементов (кристаллитов, блоков) с различной структурой и/или составом. Это многофазные материалы, например, на основе сложных металлических сплавов.

*Вторая и третья категории наноматериалов* подпадают под более узкие определения *нанокристаллических* или *нанофазных материалов*.

*К четвертой категории* относятся композиционные материалы, содержащие в своем составе компоненты из наноматериалов. При этом в качестве компонентов могут выступать наноматериалы, отнесенные к первой категории (композиты с наночастицами и/или нановолокнами, изделия с измененным ионной имплантацией поверхностным слоем или тонкой пленкой) и второй категории (например, композиты, упрочненные волокнами и/или частицами с наноструктурой, материалы с модифицированным наноструктурным поверхностным слоем или покрытием). Можно выделить также композиционные материалы со сложным использованием наноконструктивных материалов [16].

**Важным этапом развития нанотехнологии** является целенаправленное создание не материалов, а готовой продукции с принципиально новыми качественными характеристиками и назначением.

**Задача нанотехнологии** – конструирование, создание, синтез материалов и объектов с заранее заданными свойствами, установление зависимости физико-химических свойств от размера наночастицы или количества атомов в ней (рис. 24).



Рис. 24. Задачи нанотехнологии

## 4.2. Углеродные наноматериалы

В 1985 г. Г. Крото (Англия), Р. Керл и Р. Смолли (США) открыли новую аллотропную форму углерода (фуллерен) и исследовали его свойства. За открытие фуллерена в 1996 г. ученым была присуждена Нобелевская премия [16].

В 1991 г. японский физик С. Ииджима открыл новую форму углеродных кластеров – углеродные нанотрубки, которые проявляют целый спектр уникальных свойств и являются основой для революционных преобразований в материаловедении и электронике.

В 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 А. Гейму и К. Новоселову в 2010 г. присуждена Нобелевская премия.

*К углеродным наноматериалам относятся:*

- фуллерены и их производные;
- углеродные нанотрубки;
- углеродные нановолокна;
- наноалмазы;
- графены.

На рис. 25 представлены углеродные наноматериалы [15].

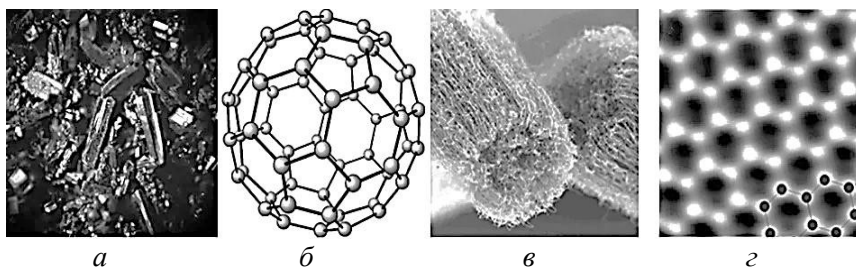


Рис. 25. Углеродные наноматериалы:

*a* – кристаллический фуллерен  $C_{60}$  (фуллерит); *б* – молекула фуллерена  $C_{60}$  диаметром 0,75 нм; *в* – многослойные углеродные нанотрубки с наибольшим диаметром 12 нм и толщиной 0,34 нм; *г* – графен (расстояние между атомами углерода в гексагональных кольцах 0,14 нм)

Структура углеродных наноматериалов приведена на рис. 26.

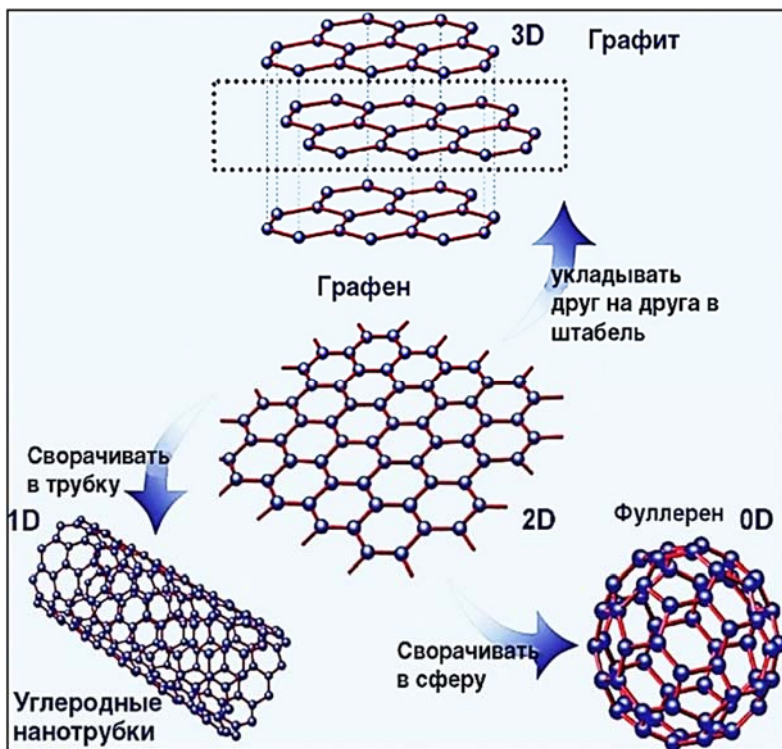


Рис. 26. Структура углеродных наноматериалов

**Получение углеродных наноматериалов** (углеродных нанотрубок, нановолокон, фуллеренов и др.):

1. Электродуговой метод – образование фуллеренов, углеродных нанотрубок (УНТ) при распылении графитового электрода в электрической дуге, горящей в атмосфере гелия.
2. Лазерная абляция – образование УНТ при испарении графитовой мишени под действием лазерного луча.
3. Пиролиз углеводородов – химическое осаждение углеродсодержащего газа на поверхности металлического катализатора.

### 4.2.1. Фуллерены

Фуллерены – аллотропные молекулярные формы углерода, в которых атомы расположены в вершинах правильных пяти и шестиугольников, покрывающих поверхность сферы или сфероида [17]. В фуллерене плоская сетка шестиугольников (графитовая сетка) свернута и сшита в замковую сферу. При этом часть шестиугольников преобразуется в пятиугольники. Образуется структура – усеченный икосаэдр. Каждая вершина этой фигуры имеет трех ближайших соседей.

Известны получаемые в достаточно больших количествах  $C_{60}$ ,  $C_{70}$ ,  $C_{76}$  и др. Наиболее устойчивую форму имеет  $C_{60}$ , сферическая полая структура которого состоит из 20 шестиугольников и 12 пятиугольников (рис. 27).

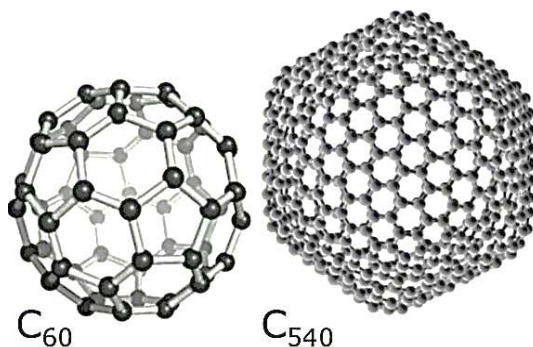


Рис. 27. Фуллерены

Фуллерены могут найти применение в качестве присадок для ракетных топлив, смазочного материала, для создания фотоприемников и оптоэлектронных устройств, катализаторов роста, алмазных и алмазоподобных пленок, сверхпроводящих материалов, а также в качестве красителей для копировальных машин. Фуллерены применяются для синтеза металлов и сплавов с новыми свойствами [18].

### 4.2.2. Нанотрубки

Нанотрубки – это протяженные цилиндрические структуры диаметром от одного до нескольких десятков нанометров и длиной до

нескольких сантиметров, состоящие из одной или нескольких свернутых в трубку гексагональных графитовых плоскостей и заканчивающиеся обычно полусферической головкой, которая может рассматриваться как половина молекулы фуллерена (рис. 28).

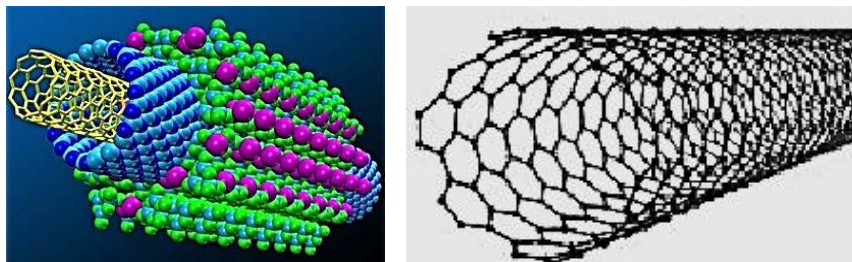


Рис. 28. Нанотрубки

Благодаря таким характеристикам нанотрубок, как прочность, изгиб, проводимость, используются:

- в качестве добавок к полимерам;
- в качестве катализаторов для осветительных устройств, а также плоских дисплеев и трубок в телекоммуникационных сетях;
- в качестве поглотителя электромагнитных волн;
- для преобразования энергии, изготовления анодов в различных видах батареек;
- для хранения водорода, изготовления датчиков и конденсаторов;
- для производства композитов и усиления их структуры и свойств.

### ***4.2.3. Графен***

Графен (рис. 29) – представляет собой одиночный слой атомов углерода, соединенных между собой структурой химических связей, напоминающих по своей геометрии структуру пчелиных сот. Графен обладает уникальными физико-химическими свойствами, которые делают его незаменимым в самых разных сферах (в частности в электронике), а также является прекрасным проводником электрического тока.

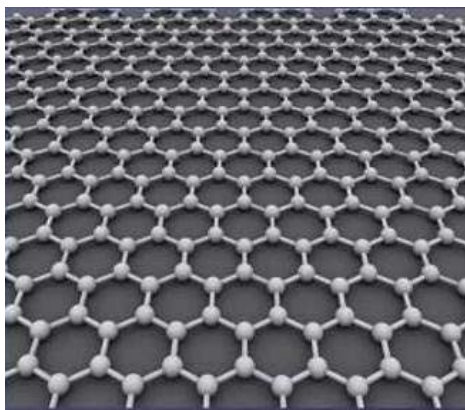


Рис. 29. Графен

### 4.3. Применение нанотехнологий

**Технологическое машиностроение.** Основа  $\text{SiO}_2$  – легко очищающиеся и водоотталкивающие покрытия, которые выдерживают температуру  $400\text{ }^\circ\text{C}$  (водоотталкивающий эффект длится 4 месяца) [15, 16].

Основа  $\text{TiO}_2$  – самоочищающиеся поверхности (окисляют и расщепляют грязь, нейтрализуют различные запахи, убивают микроорганизмы). Разработаны для стекла, тканей, металла, пластика, керамики.

Самоочищающиеся покрытия на основе нанопорошков, прозрачных лаков, изготовленных с использованием нанотехнологий, защищают кузов от царапин в три раза эффективнее, чем обычный лак.

**Нанотехнологии в автомобилестроении** – газовые датчики, микропереключатели, датчики ускорения, лобовое стекло – поляриод, добавки в топливо и масло, покрытия для деталей двигателя и новые лакокрасочные покрытия.

**Нанотехнологии в машиностроении** используются в следующих сферах: авиакосмическое машиностроение, автомобилестроение, производство конструкционных материалов, инструментальное производство, приборостроение.

**Перспективные направления нанотехнологий:**

1. **Молекулярный дизайн.** Препарирование молекул и синтез новых молекул в сильно неоднородных электромагнитных полях.

2. **Наноматериаловедение.** Создание бездефектных высокопрочных материалов, материалов с высокой проводимостью.

3. **Наноприборостроение.** Создание сканирующих туннельных микроскопов, атомно-силовых микроскопов, магнитных силовых микроскопов, миниатюрных сверхчувствительных датчиков, нанороботов.

4. **Наноэлектроника.** Конструирование нанометровой элементной базы для ЭВМ следующего поколения, нанопроводов, полевых транзисторов, выпрямителей, дисплеев, акустических систем.

## **Раздел 5. ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

Метод порошковой металлургии (ПМ) в последние годы прочно вошел во все сферы техники [17–20]. С его помощью производят различные материалы, имеющие уникальные функциональные характеристики. Сегодня из них изготавливаются конструкционные элементы машин и механизмов, металлорежущий и породоразрушающий инструмент, подшипники и прочие компоненты узлов трения, детали электротехнического оборудования и оснащения атомных реакторов, магниты, охладители испарительного типа, множество других незаменимых изделий промышленного назначения. Повсеместное распространение получил в последнее время также способ нанесения на металлические поверхности защитных покрытий путем напыления и наплавления. Технологическими достижениями в сфере ПМ обусловлено создание порошковой продукции исключительных функциональных качеств, при наиболее выгодных экономических характеристиках, способствующих ресурсо- и энергосбережению. В последние годы ПМ развивается особенно бурно в плане разработки как инновационных технологий, так и новейших порошковых материалов. Современные порошковые материалы по видам применения условно подразделяют на следующие функциональные категории:

- конструкционные (включая группы металлов и их сплавов, металллокерамических твердых сплавов и минералокерамики);
- пористые (включая группы фильтрующих, триботехнических, «потеющих» и пеноматериалов);
- электротехнического назначения;
- специальные материалы для ядерной энергетики и др. [13].

### **5.1. Конструкционные порошковые материалы**

Конструкционными называют материалы металлического, неметаллического и композиционного генеза, сочетающие в себе комплекс свойств, обеспечивающих возможность применения в машиностроительных отраслях для производства наиболее ответственных узлов и агрегатов.

Порошковые материалы конструкционного назначения – самая распространенная продукция ПМ. Потребность в них сегодня достигает 65 % общей востребованности. Обладая набором высоких механических характеристик, они повсеместно используются в машиностроении для производства высоконагруженных шестерен, звездочек, зубчатых колес, червячных пар, клапанов и седел к ним, муфт, фланцев, эксцентриков, накладок, заглушек, храповиков, гаек, ограничителей, кулачков, шайб, крышек, корпусов подшипников, компонентов насосного оборудования и измерительного инструмента, различных дисков, втулок, деталей множества других элементов технических устройств. Основным требованием, предъявляемым к материалам данной категории, является сочетание повышенных физико-механических свойств и экономичности [13].

Порошковые изделия конструкционного назначения представлены на рис. 30.



Рис. 30. Порошковые изделия конструкционного назначения

Изделия из конструкционных материалов подразделяются на мало-нагруженные, средненагруженные и высоконагруженные, а по типу материала – продукцию на основе черных (стали/чугуны), цветных (сплавы Al, Mg, Ti, Cu и др.) и тугоплавких металлов (W, Mo, Nb, Ta и др.), а также полученную из твердых сплавов металлокерами-

ческого генеза, безметаллической порошковой керамики и композитных армированных материалов.

Правильность выбора конструкционных материалов прямо зависит от того, насколько верно учтены особенности их применения в технологическом-экономическом и эксплуатационном аспектах, последний из которых обусловлен наличием подходящего химического состава и необходимых физико-механических свойств [13].

**Конструкционные металлические материалы.** По признаку технологического исполнения материалы данной группы подразделяются на подгруппы деформируемых, литейных и спеченных, что отображается в их маркировке [19]. В табл. 6 приводятся физико-механические свойства и области применения наиболее востребованных марок конструкционных порошковых материалов (ГОСТ 28378) и сферах их практического использования [20].

Таблица 6

Физико-механические свойства и области применения порошковых конструкционных материалов на основе железа

Марки, область применения	Плотность $10^3 \text{ кг/м}^3$	Твердость НВ	Временное сопротивление при растяжении, МПа	Относительное удлинение, %
1	2	3	4	5
Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые				
ПК10 Изделия пористые ненагруженные	6,4	500	140	3
	6,8	650	180	4
	7,2	800	220	6
	7,6	900	260	20
Стали малоуглеродистые, углеродистые, медистые				
ПК40 Изделия плотные средне- нагруженные	6,4	750	190	1
	6,8	900	240	2
	7,2	1 000	290	4
	7,6	1 100	400	10
ПК70 Изделия пористые износостойкие	6,0	800	200	–
	6,4	1 000	250	1
	6,8	1 200	300	1
	7,4	1 450	600	4

1	2	3	4	5
ПК10Ф Изделия пористые ненагруженные	6,8	650	200	3
ПК10Д2Ф Изделия пористые ненагруженные	6,0	600	200	1
ПК10Д3 Изделия пористые ненагруженные	6,0	550	160	1
	6,4	650	200	2
	6,8	750	240	3
	7,4	900	500	15
ПК10Д3К Изделия пористые ненагруженные	6,0	550	160	1
	6,4	650	200	2

В практике машиностроения и технологии порошковой металлургии наибольшее распространение получили конструкционные порошковые материалы на основе железа: сталь малоуглеродистая, углеродистая и медистая; хромистая, марганцовистая и медьникель-марганцовистая; нержавеющая. По ГОСТ 28378 условное обозначение конструкционного порошкового материала состоит из обозначения его марки и через дефис – минимальной плотности ( $\text{г/см}^3$ ). Например: ПК10-68 – сталь порошковая конструкционная малоуглеродистая со средней массовой долей углерода 0,1 % и минимальной плотностью 6,8  $\text{г/см}^3$ ; ПК40Н2Д2-64 – сталь порошковая конструкционная медьникелевая со средней массовой долей углерода 0,4 %, никеля (Н) – 2 %, меди (Д) – 2 % и минимальной плотностью 6,4  $\text{г/см}^3$ .

**Материалы фирмы «Hoganas».** В табл. 7 приведены физико-механические свойства низколегированных и нержавеющих наиболее применяемых порошковых сталей фирмы «Hoganas» [17].

Таблица 7

**Физико-механические свойства и области применения  
порошковых сталей фирмы «Hoganas»**

Марка	C, %	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Механические свойства			
			$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	HV10
<b>Низколегированные стали</b>						
Distaloy SA	0,25/0,75	7,0	490/600	310/450	3,5/1,9	130/200
Distaloy AB	0,25/0,75	7,1	500/630	360/500	4,4/2,5	150/210
Distaloy SE	0,25/0,75	7,0	600/630	400/410	4,0/2,0	160/220
Distaloy AE	0,5/0,8	6,8	560/505	310/360	1,8/0,8	170/205
		7,1	651/610	350/390	2,2/1,2	190/240
		7,2	690/630	370/400	2,0/1,1	200/250
Distaloy HP-1	0,2/0,5	6,7	550/740	400/450	1,7/1,3	140/210
		7,1	680/980	460/520	2,6/1,8	170/280
		7,2	730/1030	490/495	2,7/1,9	190/300
PNC60	–	6,9	420	310	7,5	140
	0,3	6,9	420	330	5,3	140
	0,9	–	580	490	2,0	175
PASC60	0,3	7,0	490	330	8,0	150
	0,9	–	630	530	1,5	195
Astaloy CrMo	0,3/0,5	6,7	650/720	440/550	1,1/1,8	205/260
		7,3	840/870	550/690	1,9/2,9	280/350
Astaloy Mo	0,2/0,6	6,7	250/440	170/330	1,3/1,7	110/130
		7,3	380/660	220/500	1,7/3,3	140/210
<b>Нержавеющие стали</b>						
3I6L	–	6,4	300	270	2,2	122
		6,8	380	330	3,9	147
410L	–	6,4	260	250	0,3	243
		6,8	310	300	0,65	295
430 L	–	7,0	434/248	233/172	7,0/8,8	140/176

## 5.2. Пористые порошковые материалы

Пористые материалы включают антифрикционные материалы, фрикционные материалы, фильтры.

### 5.2.1. Антифрикционные материалы

Область применения пористых подшипников – машиностроение, приборостроение, автотракторостроение, сельскохозяйственное машиностроение, угольная, пищевая, фармацевтическая промышленность. Преимущества пористых подшипников по сравнению с литыми [18]:

- 1) лучшая прирабатываемость;
- 2) самосмазываемость (позволяет отказаться в ряде случаев от подвода масла извне, что очень важно, например, для труднодоступных узлов машин, в случае, когда возможен брак продукции вследствие попадания в нее смазки от масленок);
- 3) меньшая дефицитность материалов для изготовления металло-керамических подшипников (экономия цветных металлов);
- 4) меньшие затраты труда по сравнению с изготовлением изделий из литых материалов;
- 5) высокая эксплуатационная стойкость, превышающая в ряде случаев стойкость подшипников скольжения с вкладышами и втулками из бронзы, баббита, чугуна.

В настоящее время наибольшее применение нашли пористые железные, железграфитовые (1–3 % Гр, 97–99 % Fe), бронзографитовые (88–89 % Cu, 9–10 % Sn, 2–4 % Гр) подшипники, а также подшипники на основе алюминия (10 % Cu, 3 % Гр, остальное Al). Разновидностью антифрикционных материалов являются многослойные, основным из которых считается трехслойный, состоящий из стальной ленты с медно-никелевым и баббитовым слоями. Этот материал пришел на смену баббитовым вкладышам в автомобилестроении, так как у них при заливке коренных и шатунных подшипников современных двигателей наблюдалось выкрашивание, объясняющееся появлением усталостных трещин. Трехслойные материалы не обладают отмеченным недостатком, наоборот, обладают повышенными антифрикционными свойствами благодаря содержащемуся в порах маслу (или добавкам графита, действующим аналогичным образом). Образцы изделий из антифрикционных материалов представлены на рис. 31.

Химический состав, пористость, твердость порошковых антифрикционных материалов на основе железа представлены в табл. 8.



Рис. 31. Образцы изделий из антифрикционных материалов [19]

Таблица 8

Химический состав, пористость, твердость порошковых антифрикционных материалов на основе железа [21]

Марка	Cu	C	S	Прочее	Пористость, %	Твердость НВ, МПа
	%					
ПА-Ж	–	0,3	–	–	17–34	200
ПА-ЖД5	4,8–10,0	0,5	–	–	16–27	500
ПА-ЖДК	2,3–3,5	0,5	0,2–0,4	–	15–23	450
ПА-ЖГр2	–	1,4–2,0	–	–	15–25	500
ПА-ЖГрД5	4,8–10,0	0,7–1,3	–	–	16–27	500
ПА-ЖГрДК	2,3–3,5	0,8–1,5	0,2–0,5	–	15–25	600
ПА-ЖГрДК6	2,7–3,5	0,6–1,5	1,6–6,0	–	18–25	600
ПА-ЖГрФ1К	–	0,6–1,2	0,8–1,2	P 0,3-0,7	До 20	1100
ПА-ЖХ20КБ	–	0,2–0,8	0,3–1,5	Mo 0,2–0,5 Cr 17,0–23,0 B 0,02–0,80	20–30	700

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе железа приведены в табл. 9.

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе железа [21]

Марка	Условия работы	Область применения
ПА-Ж, ПА-ЖК	Работают при обильной смазке, давлении до 2,5 МПа и скоростях скольжения 1–2 м/с. В режиме самосмазывания нагрузки до 1,5 МПа, коэффициент трения 0,03–0,06. Присутствие серы увеличивает срок службы и улучшает обрабатываемость материала	Прецизионные подшипники приборов, бытовой аппаратуры, счетно-решающих машин, текстильного оборудования
ПА-ЖД, ПАЖД5, ПА-ЖДК, ПАЖГр, ПА-ЖГр2, ПАЖГр3, ПА-ЖГрД, ПА-ЖГрД5, ПА-ЖГр2Д	Работают в условиях ограниченной и обильной смазки при давлениях до 4 и 10 МПа соответственно и скорости скольжения до 3 м/с. В режиме самосмазывания до 2 МПа. Коэффициент трения 0,035–0,125 в зависимости от количества смазки и состава материала. Материалы с увеличенным содержанием графита работают на верхнем пределе указанных нагрузок, при скоростях скольжения до 5 м/с имеют больший срок службы, меньший износ и коэффициент трения. Присутствие серы увеличивает износостойкость и улучшает обрабатываемость материала	Подшипники и детали узлов трения тракторов, сельхозмашин, станков, приборов, аппаратов бытовой техники, автомобилей, например, деталей телескопических амортизаторов, редукторов лебедки и др.
ПА-ЖГрК, ПА-ЖГр2К, ПА-ЖГрДК, ПА-ЖГрДК1, ПА-ЖГрДК6, ПА-ЖГрЦс	Работают в режиме самосмазывания и ограниченной подачи смазки при давлении до 12 МПа, при скоростях скольжения 3–8 м/с, при повышенных температурах до 250 °С. Коэффициент трения 0,01–0,1	Подшипники скольжения и другие детали узлов трения автомобилей, станков, различных машин и механизмов. Например, втулки направляющей клапана компрессора бытового холодильника и др.
ПА-ЖХ20КБ, ПА-ЖХ18Н15КБ	Предназначены для работы без смазки в воде и других агрессивных средах, при температурах до 600 °С	Армировочные втулки насосов водоподъема, подшипники

В порошковой металлургии достаточно широкое распространение получили антифрикционные материалы на основе меди – бронзы. Бронзами называют медные сплавы, в которых основными легирующими элементами являются различные металлы, кроме цинка. Бронза по сравнению с латунью обладает более высокой прочностью, коррозионной стойкостью и антифрикционными свойствами. По учебному пособию О. В. Пасютиной «Материаловедение» [8] химический состав и механические свойства антифрикционных порошковых материалов на основе меди представлены в табл. 10 и 11 [21].

Таблица 10

Химический состав, пористость, твердость антифрикционных материалов на основе меди [21]

Марка	Sn	C	Fe	Ni	Cr	Пористость, %	Твердость, НВ, МПа
	%						
ПА-БрО	9,5–10,5	До 0,25	–	–	–	18–27	350
ПА-БрОГр	9,5–10,5	0,5–1,0	–	–	–	15–28	250
ПА-БрОГр2	9,0–11,0	1,5–2,5	–	–	–	15–25	250
ПА-БрОХ	4,5–5,5	–	–	6,5–7,5	9,5–10,5	4–20	900
ПА-БрОХН	4,5–5,5	–	–	6,5–7,5	9,5–10,5	4–20	900
ПА-ДГр10	–	9,0–11,0	–	–	–	2–9	200

Таблица 11

Механические свойства антифрикционных порошковых материалов на основе меди [21]

Марка материала	Предел прочности при изгибе, МПа	Временное сопротивление при растяжении, МПа
	Не менее	
ПА-БрО	100	60,0
ПА-БрОГр	–	78,5
ПА-БрОГр2	–	70,0
ПА-БрОГр4	–	60,0
ПА-БрОЖГр	–	78,5
ПА-БрОХ	390	176,0
ПА-БрОХН	430	215,0
ПА-ДГр10	50	–

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе меди представлены в табл. 12.

Таблица 12

Условия работы и области применения порошковых антифрикционных материалов на основе меди [21]

Марка	Условия работы	Область применения
ПА-БрО	При смазке маслом допустимое давление до 5 МПа при скорости скольжения 2 м/с. При ограниченной смазке маслом и в режиме самосмазывания допустимое давление до 1,9 МПа при скорости скольжения до 1,5 м/с в диапазоне температур от -60 до +120 °С. Не требуют дополнительной смазки в течение 3–5 тыс. часов, имеют низкий и стабильный коэффициент трения (0,01–0,04), низкий уровень шума	Подшипники узлов трения приборов магнитной записи и воспроизведения, малогабаритных редукторов, электродвигателей, акустических приборов, машин по обработке пищевых продуктов, бытовых приборов, текстильных машин и др. Применяются с целью замены подшипников качения, литых сплавов на основе цветных металлов (бронз, баббитов и др.)
ПА-БрОГр, ПА-БрОГр2, ПА-БрОГр4, ПА-БрОЖГр	При смазке маслом допустимое давление до 6 МПа при скорости скольжения до 2 м/с. В режиме самосмазывания допустимое давление до 3 МПа при скорости скольжения 1–2 м/с, имеют коэффициент трения 0,03–0,06, низкий износ, бесшумны в работе	Подшипники узлов трения швейных машин, аппаратов и приборов бытовой техники, соковыжималок, фенов, магнитофонов, электрических двигателей малой мощности, конвейеров, счетно-вычислительных машин, плат малогабаритных редукторов, автомобилей, тракторов, комбайнов, мотоциклов и т. п. Заменяют оловянные литые бронзы, латуни, подшипники

Марка	Условия работы	Область применения
ПА-БрОХ, ПА-БрОХН	Предназначены для работы в условиях смазки при средних и тяжелых нагрузках (7–10 МПа), при незначительных скоростях скольжения (около 1 м/с). Могут подвергаться термообработке (закалке, старению), повышающей их физико-механические свойства. Коэффициент трения при смазке до 0,1 без смазки до 0,7	Детали узлов трения для машиностроения, автостроения, приборостроения, гидронасосов, судостроения и др. Заменяют баббиты, литые бронзы типа марок БрО5Ц5С5; БрО012; БрОЗО; БрАЖ9-4, БрАЖМц10-3-1
ПА-ДГр10	Предназначены для работы без смазки, при высоких скоростях скольжения (до 50 м/с), в присутствии активных жидких и газовых сред	Узлы трения насосов, приборов и др. механизмов, торцевые уплотнения быстро-вращающихся валов

### 5.2.2. Фрикционные материалы

Фрикционные материалы – это материалы, применяемые для изготовления деталей, работающих в условиях трения скольжения, и имеющие большой коэффициент трения [21]. Их основное назначение – поглощать механическую энергию контактируемых деталей, перерабатывая ее в тепловую, которая затем рассеивается в окружающую среду. Благодаря этому они нашли широкое применение в различных областях транспортного и промышленного машиностроения.

Основными достоинствами таких материалов являются: стабильное значение коэффициента трения ( $0,05 \div 0,09$  для композитов на основе меди); высокая износостойкость ( $1 \div 8$  мкм/км); хорошая теплопроводность ( $0,065 \div 0,13$  кал/см · град); низкая зависимость коэффициента трения от климатических условий; высокий срок службы ( $9\ 000 \div 10\ 000$  моточасов); экологическая чистота процесса получения.

Широкое распространение в машиностроительной отрасли получили фрикционные изделия в виде дисков, представляющих собой стальную несущую основу с нанесенным с двух сторон фрикционным слоем. Медь в качестве материала основы используется пре-

имущественно для узлов трения, работающих в условиях граничной смазки, при относительно не высоких контактных температурах (до 400 °С). Состав материала определяет технологию получения конечного изделия.

В настоящий момент существует большое количество способов получения фрикционных дисков (напекание, напыление, электроформование, накатка и другие), однако наиболее производительным является способ напекания свободно насыпанного слоя к стальной основе через тонкий компактный подслой меди, наносимый гальваническим способом. Указанный способ обладает относительно высокой производительностью, отличается технологической простотой, позволяет получать фрикционные диски большого размера.

Фрикционные порошковые материалы (ГОСТ 17359-82) при степени пористости 10–13 % имеют высокие показатели коэффициента трения, износо/тепло/коррозионной стойкости, прочности, прирабатываемости. Поэтому их используют в составе технических устройств, предназначенных для передачи или рассеивания кинетической энергии (тормозов, фрикционных муфт, демпферов и др.).

Результативность эксплуатации фрикционных материалов во многом зависит от показателей коэффициента трения и износоустойчивости. Они состоят из металлических и неметаллических компонентов для деталей, работающих в масле (75 %) и при сухом трении, в виде, соответственно, металлической основы (стальной, чугунной, медно-никелевой и т. д.). При этом металлокомпоненты позволяют добиться высоких значений теплопроводности и прирабатываемости, а безметаллические составляющие ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , графит и др.) способствуют увеличению силы трения и минимизируют возможность заедания вследствие схватывания.

К наиболее востребованным маркам фрикционных материалов относят: ФМК-8, ФМК-11, МКВ-50А, СМК-80, МК-5, МК-263 [13].

Широкие возможности ПМ позволяют получать современные фрикционные материалы с различными наборами заданных функциональных свойств (рис. 32) [13].

Первые 3 марки разработаны для сильнонагруженных тормозов, муфт сцепления летательных аппаратов и дорожной техники военного назначения. Марка СМК-80 используется в составе тормозов и муфт сцепления большегрузной автотехники (например, карьерные самосвалы грузоподъемностью свыше 70 т). Самыми же рас-

пространенными являются марки МК-5 и МК-263 на латунно-бронзовой основе, предназначенные для эксплуатации в условиях тяжелых и средних нагрузок при температуре поверхности трения не выше 550–650 °С. Из материалов данных марок производят широчайший ассортимент дисков сцепления и тормозных колодок, которыми комплектуют автотракторную технику и спецтехнику строительного и дорожно-строительного назначения. В последнее время для автомашин, тракторов, малой и средней грузоподъемности все чаще используются фрикционные материалы на полимерной основе [13].



*а*



*б*

Рис. 32. Фрикционные материалы:  
*а* – изделия из спеченных фрикционных металлопорошков; *б* – припекаемые к основе под давлением керамические фрикционные накладки [13]

### 5.2.3. Фильтрующие материалы

Пористые фильтры (степень пористости 45–55 %), применяемые для механической очистки различных жидкостей и газов от частиц посторонних включений, составляют значительную долю продукции, выпускаемой из пористых порошковых материалов [20]. Они изготавливаются методом формовки (формопрессование с различными усилиями или свободная засыпка в формы) с последующим спеканием бронзового, никелевого, титанового, вольфрамового, молибденового порошка, а также порошков нержавеющей стали и тугоплавких композиций. Рабочий температурный диапазон составляет от –270 до +1000 °С.

Определяющими критериями качества пористых фильтроматериалов являются:

- характер пористости;
- степень проницаемости;
- тонкость очистки;
- грязеемкость;
- капиллярность [13].

Методами ПМ в числе прочих изготавливают фильтрующие элементы, степень пористости которых, а значит, и очищающую способность, можно изменять и даже регулировать в зависимости от круга конкретных задач (рис. 33) [13].

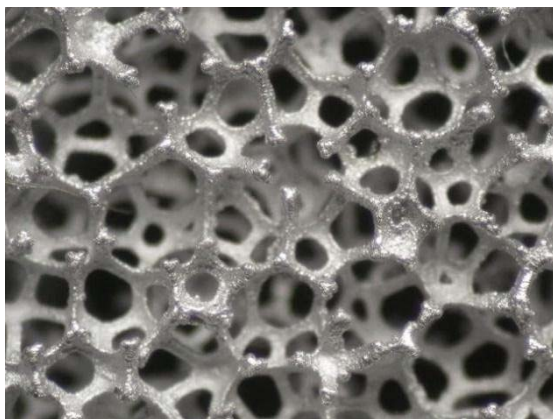


Рис. 33. Структура пористого фильтра

**Характер пористости.** Различают пористость наружную (открытые поры) и внутреннюю (закрытые поры). При этом в наружной пористости проявляется сочетание пор сквозного и несквозного (тупикового) характера. Степенью сквозной пористости определяется интенсивность пропускаемого потока очищаемой среды – критерий, именуемый скоростью очистки [13].

**Степенью проницаемости** называют показатель, определяющий пропускную способность фильтрующего элемента и выражаемый количественным значением интенсивности фильтруемого потока, проходящего за единицу времени через единицу рабочей площади при стабильной силе давления. Степень проницаемости увеличивается по мере возрастания степени пористости и количества сквозных наружных пор в сравнении с количеством тупиковых [13].

**Тонкость очистки (фильтрации)** – показатель, количественно характеризующий качество процесса очистки фильтруемой среды от посторонних включений (загрязнений). Общая очищающая способность фильтра определяется соотношением значений абсолютной и номинальной тонкости фильтрации, а также коэффициентом полноты очистки. Абсолютной тонкостью фильтрации называют значение показателя наибольшего размера пропускаемых сквозь фильтр загрязняющих частиц, а номинальной тонкостью – их наименьшего размера. Коэффициентом полноты очистки характеризует количественное значение уменьшения массы загрязнений в фильтруемой среде при ее единоразовом пропускании сквозь фильтрующий элемент [13].

**Грязеемкость** – количественный показатель массы загрязняющих включений, которую способна задержать единица площади фильтра во временном интервале увеличения силы давления от начальной до предельной.

**Критерий капиллярности** характеризует в количественном выражении особенности процесса взаимодействия пористого фильтрующего элемента с очищаемыми средами. Величина потенциала капиллярности (для жидкостей) определяется произведением наибольшей высоты, на которую способна подняться жидкость в данном пористом теле, на величину ускорения свободного падения.

Спекаемые фильтрующие элементы производят из металлопорошков однородной дисперсии и требуемого химсостава. Зерна при этом могут по своей форме быть сферичными и несферичными.

Важнейшим достоинством фильтрующих элементов из несферич-ных порошков является повышенная механическая прочность, до-стигаемая благодаря более плотному взаимодействию зерен произ-вольной конфигурации, чем у сферичных порошков, округлые зерна которых могут вступать лишь в точечный контакт. Тем не менее, спеченные пористые фильтры чаще всего изготавливают из сферич-ных порошков, поскольку такие изделия характеризуются гораздо бо́льшей степенью проницаемости, поддаваясь, к тому же, регули-рованию и восстановлению. Порошковые фильтры имеют целый ряд преимуществ перед непорошковыми аналогами, среди которых основными являются:

- несложное изготовление;
- повышенная прочность;
- лучшие очищающие свойства;
- высокие значения жаростойкости, теплопроводности, сопротив-ления абразивному износу;
- равномерное распределение фильтрации по всей площади фильт-рующего элемента [13].

По форме фильтрующие элементы из спеченных порошковых ма-териалов могут являть собой диски, пластинки, цилиндры, втулки, конусы и фасонные изделия более сложной конфигурации (рис. 34).



Рис. 34. Пористо-порошковые фильтрующие элементы

Для изготовления бронзовых фильтров применяют, по преиму-ществу, порошки со сферичными зернами, получаемые распылением расплава. Температура спекания  $T$  заготовок может быть в пределах 855–955 °С при длительности процесса 35–65 мин. Из бронзовых по-рошков крупной дисперсии (диаметр зерен 55–135 мкм) производят

фильтры, с помощью которых осуществляют грубую очистку; из мелкодисперсных порошков (диаметр зерен 1,8–30,5 мкм) – фильтры, способные осуществлять тонкую очистку. Использование бронзовых фильтров распространено во множестве промышленных отраслей. С их помощью очищают от посторонних частиц размерами 4,5–210 мкм горюче-смазочные материалы для ДВС и двигателей на реактивной тяге, различные газы и кислотно-щелочные среды, парафиновые расплавы и т. д. Никелевые пористые фильтры производят (путем формовки-спекания в температурном режиме 1 050–1 150 °С) из порошков, имеющих электролитическое либо карбонильное происхождение. Помимо фильтрующих элементов, из них изготавливают также группу пористых электродов для никель-кадмиевых и щелочных аккумуляторов [13].

Широко востребованными являются порошковые фильтры из нержавеющей стали, которые, в сравнении с никелевыми, более устойчивы к коррозии, имея, к тому же, меньшую стоимость. Первичные заготовки производят при помощи пресс-форм или прокатывания, после чего спекают в продолжение 2,5–3,5 ч при 1 210–1 255 °С. Для производства таких фильтров используются порошки сталей марок Х17Н2, Х18Н9, Х30 и некоторых других.

Фильтры данного типа применяются в металлургии: с их помощью очищают от механических примесей жидкое литье и горячие доменные/мартеновские газы. Нередко их используют в качестве противопожарной преграды на участках автогенной сварки и обработки металлов газопламенным методом, а также в емкостях для легковоспламеняющихся и взрывоопасных жидкостей.

Титановые пористые фильтры изготавливают из порошков карбонильного генеза, диаметр зерен которых не превышает 61 мкм (с применением наполнителя), а в некоторых случаях – из электролитического порошка с диаметром зерен до 1,2 мм (наполнитель не применяют). Спекание осуществляют в специальных газовых средах при 955–1 155 °С в продолжение 1,6–2,6 ч. Востребованность пористотитановых фильтров объясняется наличием таких полезных функциональных качеств, как высокая стойкость к воздействию коррозии при фильтровании агрессивных жидкостей и газов в сочетании с высокой удельной прочностью. Значение тонкости фильтрации для фильтров из пористого Ti может составлять  $\leq 5,2$  мкм.

Технология производства спеченных пористых фильтров в каждом случае является избирательной. В зависимости от особенностей условий фильтрации учитывают необходимые значения тонкости очистки, степени проницаемости, пропускной способности, прочности и размерных параметров.

Фильтры, размеры которых невелики, производят, спекая свободно засыпанный в формы исходный порошок. Формы подвергают постоянной вибрации, чтобы спекаемое содержимое равномерно распределялось по всему их объему. При этом сферичность и размеры частиц сохраняются, что обуславливает наивысшую степень проницаемости материала.

Традиционным методом производства спеченных пористых фильтров является деформирование порошка прессованием. Для изготовления фильтров высокой степени пористости (55–76 %) и повышенных прочностных характеристик в состав подвергаемой прессованию порошковой шихты вводится ряд специальных добавок, обеспечивающих усиление прочности без ущерба для пористости.

Сегодня пористые фильтрующие элементы применяются повсеместно. Их используют на всех промышленных предприятиях с целью недопущения вредных выбросов в атмосферу, для очищения природных и сточных вод, на АЭС и теплоэлектростанциях. Коррозиоустойчивые фильтры применяют для очистки кислотных-щелочных растворов, питьевой воды и т. д. [13].

#### ***5.2.4. Тепловые трубы***

Наряду с «потеющими» широкую популярность в промышленной сфере обрели пористые порошковые материалы, именуемые капиллярно-пористыми. В них рабочая жидкость также транспортируется к наружной поверхности сквозь поровые каналы, но уже не принудительно, а под воздействием естественных капиллярных сил, поскольку диаметр капиллярных пор в разы меньший в сравнении с диаметром пор «потеющих» материалов.

С появлением материалов капиллярно-пористой структуры появилась возможность создания изделий, проницаемых для одних жидкостных сред и непроницаемых для прочих, с осуществлением в капиллярах пор фазовых преобразований, сопровождаемых теплопоглощением либо, напротив, тепловыделением. Наличие данных

своих свойств обусловило применение капиллярно-пористых материалов в самых разных технических отраслях, например, в конструктивных элементах теплообменной аппаратуры.

Одним из самых перспективных направлений в этом аспекте стало создание так называемых тепловых труб, способных стабилизировать термополе в установках различного назначения и обеспечить наличие оптимальных изотермичных условий для обработки различных заготовок (рис. 35) [13].

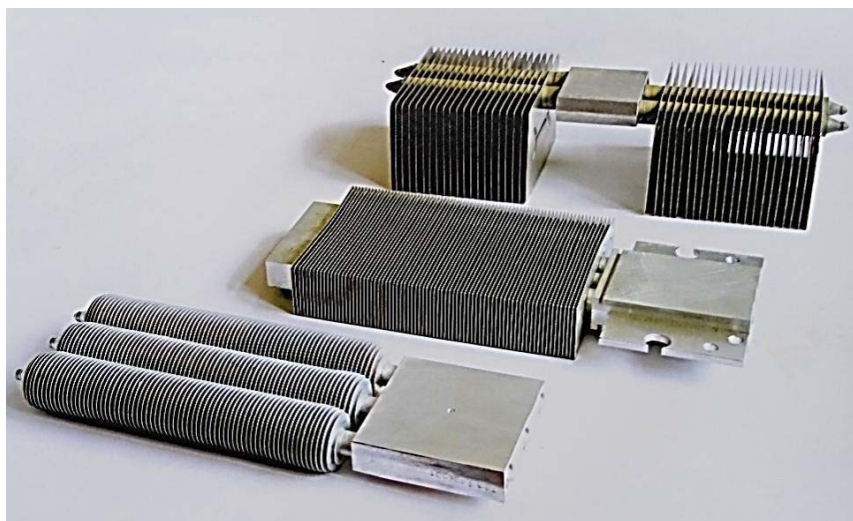


Рис. 35. Теплоотводы на основе тепловых труб для естественно-коньюктивного и принудительного воздушного охлаждения силовых полупроводниковых приборов

Так, применение низкотемпературных теплотруб, используемых в электротехнике для того, чтобы охлаждать роторы/статоры электродвигателей и электрогенераторов, а также обмотку трансформаторных сердечников, обеспечило повышение их мощностных показателей почти в полтора раза. Все чаще применяются теплотрубы с целью охлаждения тяжелых высоковольтных автоматов смыкания-размыкания цепи.

Теплотрубы, наряду с паровыми камерами, имеют существенные достоинства перед традиционными теплопередающими элементами

в виде, например, теплообменников циркуляционного типа: в них отсутствуют подвижные детали, в работе они не создают шума и не нуждаются в расходе электроэнергии на перекачивание теплоносителя из конденсационной в испарительную зону, имеют небольшую массу и отличаются незначительным термосопротивлением в сравнении с металлодержками сопоставимых габаритных параметров [13].

### **5.2.5. Высокопористые пеноматериалы**

Пеноматериалы – материалы высокой степени пористости (95,5–98,5 %), обуславливающей малые значения их плотности. К примеру, плотность пеновольфрама вшестеро меньше, нежели плотность вольфрама (соответственно, 3,1 г/см<sup>3</sup> и (19,32 г/см<sup>3</sup>). Такие материалы имеют пенопластовую основу (на базе поливинилхлоридов, полистиролов и т. п.), армированную прочным металловолокном. Используют их, главным образом, как легкие теплоизолирующие наполнители в авиастроительной и судостроительной отраслях [13].

### **5.3. Электротехнические порошковые материалы**

Несмотря на то, что некоторые из таких материалов можно причислить к конструкционным, а некоторые – к пористым, по ряду основных эксплуатационных свойств их целесообразно выделить в отдельную категорию. Электротехническая порошковая металлокерамика по большей части представляет собой псевдосплавы сложнокомпонентной структуры, получать которые можно только методами ПМ.

Группа электротехнических материалов подразделяется на подгруппы:

- электроконтактных (металлических, металлографитовых, металлооксидных и металлокарбидных), из которых производят контакты скользящего и разрывного типов;
- магнитомягких из сплавов типа Fe–Ni, Fe–Si–Al, Fe–Cr–Al и некоторых других ферросплавов;
- магнитотвердых из сплавов типа Fe–Al (альни), Fe–Al–Ni–Co (альнико), Fe–Al–Mg–Co (магнико);

– магнитодиэлектриков из карбонильного Fe, пермаллоя Fe–Ni (45–85 %), альсифера (Fe–Al (5,5 %)–Si(9,5)), ферритов (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> с включением NiO, MgO, MnO, ZnO).

Они востребованы при изготовлении электроконтактных групп, постоянных магнитов, ферритов, прочих токопроводящих материалов и диэлектриков (рис. 36) [20].



Рис. 36. Электротехническая продукция из порошковых материалов

### ***5.3.1. Контактные электротехнические материалы***

Химсостав и сферы применения электротехнических композиционно-контактных металлокерамических материалов регламентированы ГОСТ 3884-67. Их подразделяют на материалы для контактов разрывного и скользящего типа. Разрывные контакты применяются для многократных циклов (до нескольких миллионов) замыкания-размыкания электроцепей. Им присущи высокие показатели износоустойчивости, эрозионностойкости при электродуговом воздействии, механической прочности, электропроводности, они не обгорают и не склонны к самопривариванию. При этом значения контактного сопротивления должны быть минимальными, а критические показатели силы тока и дугообразующего напряжения – максимальными. Чистых металлов, способных в равной мере соответ-

ствовать перечисленным требованиям, в природе нет, поэтому разрывные контакты изготавливают только посредством ПМ, применяя, в частности, способы: формпрессования и спекания готовых изделий из металлопорошка или миксов требуемого химсостава; штампования из металло/керамо/проката, прессования заготовок пористых тугоплавких матриц с последующей их пропиткой металлами, имеющими меньшую температуру  $T$  плавления. Контакты из порошковых электротехнических материалов представлены на рис. 37 [20].



Рис. 37. Контакты из порошковых электротехнических материалов

Для получения набора требуемых функциональных характеристик и в целях экономии дефицитных цветметаллических ресурсов metallo/керамо/контакты часто выполняют многослойными, причем каждый слой представлен материалом определенного химсостава. Многослойные разрывные контакты получают путем спекания заготовок, спрессованных из порошков различного состава, загруженных в пресс-форму в виде последовательно засыпаемых слоев. Kontakтами разрывного типа комплектуют как слаботочную, так и высоковольтную аппаратуру (в этом случае применяются разрывные контакты со спеченной вольфрамовой матрицей, пропитанной более

легкоплавкими Cu или Ag). Скользящие контакты (электрощетки) производят из сплавов на базе порошков Cu, Ag, Ni, Fe с добавлением графита, нитрида бора, а также сульфидов (с целью минимизации силы трения); они применяются при изготовлении электродвигателей, электрогенераторов, потенциометров, токосъемной и другой электротехнической аппаратуры. Контакты скользящего типа используются для подвода/отведения тока на коллекторах различных электроустановок, включая: тяговые двигатели постоянного тока с пониженным напряжением, зарядные генераторы с пониженным напряжением, асинхронные двигатели любых мощностных групп с подъемными щетками, предназначенные для эксплуатации в режиме высокой окружной скорости и плотности тока; асинхронные двигатели любых мощностных групп со щетками постоянного налегания. Кроме того, скользящими контактами также комплектуют: контактные кольца к одноякорным преобразователям, эксплуатируемым в режиме высоких окружных скоростей, высокой и средней плотности тока; кольца возбуждения синхронных и электродвигателей/электрогенераторов любых мощностных групп и напряжений, эксплуатируемых в режиме средних окружных скоростей. Металло-керамические контактные электрощетки изготавливают с применением методов ПМ из микса порошков Cu, Ag и др. металлов. Применяются также порошковые углеграфитные материалы, нередко с присадками Pb, Sn и других смягчающих добавок, с тем, чтобы снизить степень жесткости материала и одновременно повысить его вибростойкость и устойчивость к распылению. Включения графита минимизируют возможность налипания и взаимосваривания металлических частиц, снижают степень окисляемости, помогают понизить коэффициенты износа и трения. Самыми востребованными являются контакты скользящего типа из меднографитных и бронзографитных композиционных материалов [20].

### *5.3.2. Магнитные электротехнические материалы*

С применением методов ПМ осуществляют получение электротехнических материалов, из которых производят постоянные магниты. Благодаря наличию постоянных магнитных свойств, а также потому, что основой каждого из них является железо (Fe), эти материалы называют также ферромагнитными.

Исходными материалами для изготовления металлокерамических магнитов служат сплавы на базе Fe с добавками легирующих присадок в виде соединений Ni, Co, Al и ряда других металлов. Микс-порошки подвергают формопрессованию, затем – спеканию, а в заключение спеченные заготовки закаливают-отпускают либо проводят их намагничивание иными способами термического воздействия. Степень пористости таких материалов должна быть минимальной, так как по мере возрастания пористости снижаются магнитные свойства. Магниты из ферромагнитной металлокерамики применяют в аппаратуре связи, медприборах, системах зажигания ДВС, полюсах электродвигателей постоянного тока и т. д. Конечная продукция из магнитных материалов представляет собой пластины, полосы, втулки, кольца, изделия других конфигураций. Порошковые магниты превосходят аналоги, изготавливаемые традиционными способами, по целому ряду функциональных параметров, основными из которых являются более точный химсостав и повышенная однородность эксплуатационных характеристик. Спеченные магнитоматериалы подразделяют на магнитомягкие (в т. ч. магнитодиэлектрики), характеризующиеся высокими показателями магнитопроницаемости и невысокими – коэрцитивной силы, а также магнитотвердые, отличающиеся напротив, малыми показателями магнитопроницаемости и высокими – коэрцитивной силы.

Коэрцитивной силой (лат. *coercitio* «сдерживание») называют такие показатели напряженности магнитных полей, которые необходимы для окончательного размагничивания постоянного магнита. Чем выше коэрцитивная сила магнита, тем он более устойчив к размагничиванию. В качестве исходных порошковых компонентов магнитомягких ферромагнетиков используются чистое железо (карбонильного или электролитического генеза), а также порошковые сплавы Fe с Ni и Co (пермаллой, перминвары и др.). Особую группу составляют порошковые ферримагнетики на основе ферритов – спеченных в кислородной среде магнитных композиционных материалов из мелкодисперсных порошковых смесей оксидов Fe с оксидами двухвалентных металлов – MnO, MgO, ZnO, NiO и др. Ферритам присущи очень высокие значения удельного сопротивления, более чем в 1000 раз превышающие аналогичный показатель для Fe. Изделия из ферромагнитных материалов приведены на рис. 38 [20].



Рис. 38. Изделия из ферромагнитных материалов

Разновидностью магнитомягких материалов являются магнитодиэлектрики. Структурно они представляют собой многокомпонентные соединения из слоистого материала-ферромагнетика, изготавливаемого на основе альсифера, карбонильного железа или пермалоев (железоникелевых сплавов), разделенных тонкими промежутками изолятора-диэлектрика (жидких стекол, бакелита, шеллака, синтетических смол). Содержание последних в магнитодиэлектриках находится в пределах от 4,5 до 16 %. Существуют также магнитодиэлектрики, изготавливаемые из мягких ферромагнетиков. Магнитотвердые (магнитожесткие) порошковые материалы производят из сплавов (типа альни, альнико, магнико, кунико, кунифе и др.), близких по химическому составу к литым. Добиться высоких показателей магнитосвойств позволяют и магнитотвердые композиции из редкоземельных химэлементов и Co (типа RCo, где R – Sm, Pr, Ce). После спекания магнитотвердых сплавов проводят их термообработку. При изготовлении магнитов из мелкодисперсных порошков (диаметр зерен до 0,6 мкм) их масса в сравнении с магнитами литого генеза снижается вдвое, что немаловажно для практических целей. Применение порошковых магнитотвердых сплавов вместо литейных позволяет увеличить выход конечной продукции более чем на 80 %. Ферромагнитные материалы востребованы в различных сферах современной электротехники. Продукция из магнитомягких материа-

лов используется в трансформаторных устройствах, электродвигателях, электрогенераторах, слаботочной аппаратуре и т. д. Из магнитомягких материалов изготавливается обширная номенклатура постоянных магнитов универсального назначения (обычно массой  $\leq 100$  г), применяемых в составе электродвигателей и других электротехнических устройств, где необходимо наличие постоянного магнитного поля. Ферритмагнетики, сочетая в себе ферромагнитные и полупроводниковые свойства, получили распространение в радиотехнике и электронике. Они, в частности, находят широкое применение в качестве ферритовых матриц высокочастотной радиоэлектронной аппаратуры (в т. ч. телевизионной) и измерительной техники, компонентов стационарных и мобильных компьютерных устройств и т. п. [20]

### ***5.3.3. Аморфные магнитоматериалы***

Новый класс порошковых магнитоматериалов – это аморфные материалы, которые применяют, в частности, при изготовлении магнитных экранов, трансформаторных сердечников и электронной аппаратуры. Аморфные металлические сплавы (АМС) производят путем почти мгновенного (в скоростном режиме  $105\text{--}106$  °C/c) замораживания расплавов (например,  $\text{Fe}_{40}\text{N}_{40}\text{P}_{10}\text{B}_{80}$ ) при обязательном условии наличия в них определенной концентрации аморфизирующих неметаллических химических элементов в виде В, Р, Si, С, либо металлических соединений. Соответственно, класс АМС условно подразделяют на подклассы «металла-неметалла» и «металла-металла». Наиболее промышленно-востребованными являются магнитомягкие аморфные сплавы первого из этих подклассов на базе металлов-ферромагнетиков Fe, Ni и Co, в сочетании с аморфизаторами в виде различных композиций неметаллических элементов. В структурном отношении АМС напоминают замерзшую жидкую субстанцию. Процесс затвердения столь стремителен, что атомы сплава как бы «замирают» в положениях, занимаемых ими при жидкой консистенции расплава. Аморфоструктуру характеризуют отсутствие кристаллоанизотропии, межблоковых и межзеренных границ, прочих структурных недостатков, присущих поликристаллическим сплавам. На рис. 39 представлены трансформаторные сердечники из аморфных порошковых материалов [20].



Рис. 39. Трансформаторные сердечники из аморфных порошковых материалов

Благодаря своей необычной структуре АМС проявляют ряд уникальных магнито-, механико- электросвойств, а также повышенную коррозиестойкость. Помимо высоких значений магнитомягкости – таких, что электромагнитные потери в АМС оказываются намного более меньшими, нежели в кристаллосплавах – данные материалы проявляют чрезвычайно высокую механотвердость и механопрочность на растяжение, нередко имея почти нулевой коэффициент теплорасширения, а величина их удельного электросопротивления втрое-вчетверо превышает аналогичное значение для Fe и ферросплавов [20].

#### 5.4. Порошковые материалы для ядерной энергетики

В современной наукоемкой ядерной энергетике находят применение порошковые материалы с набором особых свойств (на основе В, Hf, Cd, Zr, W, Pb, U, PЗЭ и т. д.), которые используют при изготовлении регуляционных стержней, замедлителей и поглотителей нейтронов, а также тепловыделяющих элементов – ТВЭЛов – с использованием порошков диоксида, карбида, нитрида U и порошков тугоплавких соединений других трансураниевых элементов (рис. 40). Физико-химические свойства порошковых материалов для ядерных

энергоустановок (ЯЭУ) – это совокупность эксплуатационных характеристик, позволяющая осуществлять в едином комплексе эффективное и безопасное взаимодействие материалов с технической окружающей средой ЯЭУ на уровне как теплоносителей (вода, газы, жидкие металлы и расплавы их солей), так и контактирующих компонентов (ядерное топливо и др.) [20].



Рис. 40. Кассета ТВЭЛОВ для реактора АЭС

К набору таких особых свойств причисляются, в первую очередь, способность данных материалов выдерживать экстремальные механические, термические и радиационные нагрузки с одновременным воздействием физических факторов. Помимо этого, данным материалам присущи высокая прочность, термостойкость, теплопроводность, устойчивость к коррозии и воздействию радиации. Весьма значимым фактором является органичное сочетание в таких материалах высоких значений температуры  $T$  плавления и теплопроводности – с одной стороны, с низкими показателями теплоемкости, коэффициента терморасширения и плотности – с другой. Немаловажным в практическом плане является и свойство совместимости, т. е. степени химического взаимодействия применяемого порошкового материала с конструкционными материалами ЯЭУ. Считается, что материалы совместимы, если они не вступают друг с другом в химическое взаимодействие, либо оно столь незначительно, что не вызывает заметных изменений химсостава, структурных особенностей и набора функциональных свойств конструкционных материалов. Решать задачи по обеспечению требуемого набора свойств материалов для ЯЭУ и их количественного выражения следует, основываясь на комплексном подходе, принимая во внимание не только особенности самих порошковых материалов, но и эксплуатационные параметры узлов конструкции реактора [20].

## Раздел 6. СВЕРХТВЕРДЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ПОКРЫТИЯ

Одним из направлений совершенствования режущих свойств инструментов, позволяющим увеличить производительность труда при механической обработке, является повышение твердости и теплостойкости инструментальных материалов. Наиболее перспективными в этом отношении являются алмаз и синтетические сверхтвердые материалы (СТМ) на основе нитрида бора [21–22].

### 6.1. Синтетические сверхтвердые материалы

#### *6.1.1. Алмазы и алмазные инструменты*

Алмазы и алмазные инструменты широко используются при обработке деталей из различных материалов. Для алмазов характерны исключительно высокая твердость и износостойкость. По абсолютной твердости алмаз в 4–5 раз тверже твердых сплавов и в десятки и сотни раз превышает износостойкость других инструментальных материалов при обработке цветных сплавов и пластмасс. Кроме того, вследствие высокой теплопроводности алмазы лучше отводят теплоту из зоны резания, что способствует гарантированному получению деталей с бесприжоговой поверхностью. Однако алмазы весьма хрупки, что сильно сужает область их применения.

Для изготовления режущих инструментов основное применение получили искусственные алмазы, которые по своим свойствам близки к естественным. При больших давлениях и температурах в искусственных алмазах удается получить такое же расположение атомов углерода, как и в естественных. Масса одного искусственного алмаза обычно составляет 1/8–1/10 карата (1 карат – 0,2 г). Вследствие малости размеров искусственных кристаллов они непригодны для изготовления таких инструментов, как сверла, резцы и другие, а поэтому применяются при изготовлении порошков для алмазных шлифовальных кругов и притирочных паст.

*Лезвийные алмазные инструменты* выпускаются на основе поликристаллических материалов типа «карбонадо» или «баллас». Эти инструменты имеют длительные размерные периоды стойкости и обеспечивают высокое качество обработанной поверхности. Применяются они при обработке титановых, высококремнистых алю-

миниевых сплавов, стеклопластиков и пластмасс, твердых сплавов и других материалов.

Алмаз как инструментальный материал имеет существенный недостаток – при повышенной температуре он вступает в химическую реакцию с железом и теряет работоспособность.

Выпускают следующие марки поликристаллических алмазов: АСБ – типа баллас (АСБ-6, АСБ-5, АСБ-5А); АСПК – типа карбонадо (АСПК-3, АСПК-2, АСПК-1); СВ, СВАБ, СВС – типа СВ – алмазных спеков, представляющих собой композиции из нитрида бора и алмазных порошков.

Из-за поликристаллического строения алмазов приведенных марок они обладают высокой динамической прочностью и изотропностью механических свойств, что позволяет использовать лезвийный инструмент, оснащенный вставками из алмаза, при обработке труднообрабатываемых и особопрочных материалов.

Монокристаллические алмазы производят двух марок: АСТ и САМ. Из марки САМ изготавливают режущий инструмент для обработки радиотехнической керамики, полупроводниковых материалов, высококремнистых цветных сплавов, марка алмаза АСТ используется для изготовления наконечников измерительных приборов. Режущий инструмент, оснащенный алмазными вставками, можно изготавливать с минимальным радиусом скругления; острота режущей кромки сохраняется довольно долго, что позволяет производить обработку с малым припуском и получать качественную шероховатость поверхности.

Для того чтобы обрабатывать стали, чугуны и другие материалы на основе железа, были созданы **сверхтвердые материалы**, химически инертные к нему. Такие материалы получены по технологии, близкой к технологии получения алмазов, но в качестве исходного вещества используется не графит, а нитрид бора.

Поликристаллы плотных модификаций нитрида бора превосходят по теплостойкости все материалы, применяемые для лезвийного инструмента: алмаз в 1,9 раза, быстрорежущую сталь в 2,3 раза, твердый сплав в 1,7 раза, **минералокерамику** в 1,2 раза.

Эти материалы изотропны (одинаковая прочность в различных направлениях), обладают микротвердостью меньшей, но близкой к твердости алмаза, повышенной теплостойкостью, высокой теплопроводностью и химической инертностью по отношению к углероду и железу [22].

### *6.1.2. Кубический нитрид бора*

Изготовленные на основе нитрида бора сверхтвердые композиционные материалы применяют в режущих инструментах для обработки цементируемых и закаленных сталей, а также других труднообрабатываемых материалов, на металлорежущих станках повышенной жесткости и точности.

Композиционные материалы подразделяются на две группы по содержанию кубического нитрида бора (КНБ): 1) с массовой долей КНБ от 95 % и выше; 2) с долей КНБ 75 % и применением различных добавок, например двуокиси алюминия. В первую группу входят: композит 10 (гексанит Р), композит 01 (эльбор Р), композит 03 (исмит), композит 02 (белбор) и др. [6]. Друг от друга композиты отличаются физико-механическими свойствами и кристаллической решеткой, зависящими от технологии изготовления композиционного материала.

Во вторую группу входят: композит 05 (и его модификация композит 05И), в состав которого входит двуокись алюминия и кубический нитрид бора, изготавливаются в виде таблеток высотой 6 мм и диаметром до 8 мм; композит 09 – поликристаллы твердого нитрида бора (ПТНБ), используется для инструмента, обрабатывающего с ударными нагрузками.

Также разработаны новые сверхтвердые материалы, имеющие довольно высокие эксплуатационные свойства. Силинит-Р – материал, полученный на основе нитрида кремния, для которого характерно отсутствие адгезии со сплавами на основе меди и алюминия, а также с большинством сталей. Из него изготавливаются многократно перетачиваемые крупные фасонные пластины и многогранные режущие пластинки.

Композиты 01 и 02 применяют для тонкого и чистового точения, преимущественно без удара, деталей из черных металлов любой твердости; композит 03 – для предварительного и окончательного точения чугунов любой твердости; композит 05 – для чистового и получистового точения без ударных нагрузок закаленных сталей и чугунов любой твердости, для торцового фрезерования чугунов; композит 10 – для предварительного и окончательного точения (растачивания) с ударом и без удара сталей и чугунов любой твердости, для торцового фрезерования закаленных сталей и чугунов. В настоя-

шее время за рубежом освоено промышленное производство нескольких марок композитов с различными свойствами, причем каждый тип инструментального материала обладает преимуществами при определенных условиях обработки.

Существует четыре основные группы материалов, эффективно обрабатываемых модификациями кубического нитрида бора:

- отбеленный чугуны; легированный никелем или хромом белый чугуны (50–65 HRC);

- закаленные стали и детали с поверхностной закалкой (50–65 HRC);

- некоторые упрочняемые сплавы (38 HRC);

- некоторые марки серого чугуна (200–220 HB) [6].

Физико-механические свойства сверхтвердых материалов представлены в табл. 13.

Таблица 13

Физико-механические свойства сверхтвердых материалов

Материал	Микротвердость, ГПа	$\sigma_{изг}$ , МПа	$\sigma_{сж}$ , МПа	Теплостойкость, °С
АСБ	75–80	490–635	490–785	650–700
АСПК	80–85	490–635	785–1 175	700–800
Композит 01 (Эльбор Р) и 02 (Белбор)	75–80	400–500	> 3 000	1 100–1 300
Композит 05 (Композит) и 06	60–70	450–500	> 3 500	1 000
Композит 09 (ПКНБ)	70–80	700–1 000	> 5 000	1 100
Композит 10 (Гексанит-Р)	60–65	700–1 000	> 4 500	1 100

При обработке черных металлов твердостью свыше 45 HRC начинает широко применяться черновое и чистовое точение с помощью композитов взамен шлифования. Такие металлы, в виду недостаточно высокой стойкости традиционных инструментальных материалов, неэффективно обрабатывать, например, твердыми сплавами или ре-

жущей керамикой. Использование для этих целей шлифования кругами из электрокорунда представляет собой довольно длительный процесс, характеризующийся низкой интенсивностью съема металла и быстрым износом круга, что ограничивает производительность.

Развитие конструкции инструментов, оснащенных искусственными сверхтвердыми материалами, идет по двум основным направлениям – создание инструментов с механическим креплением цельных, многослойных круглых и многогранных режущих пластин, а также применение перетачиваемых режущих вставок, когда конструкция с механическим креплением пластин практически невозможна. Твердость синтетического алмаза составляет приблизительно 90–100 ГПа. Он применяется для изготовления алмазных сверл, резцов, буровых колонок и инструментов для бурения наиболее твердых пород, а также для изготовления наконечников к приборам для измерения твердости и чистоты поверхности. Наиболее благоприятными условиями для синтеза алмазов является давление 4–6 ГПа и температура 1 125–1 325 °С. Получать крупные режущие пластины композитов технически достаточно сложно, так как это связано с очень высокой температурой и давлением, которые необходимы для синтеза этих материалов. Поэтому чаще используют более простые по технологии получения инструменты с напайными пластинами из КНБ, которые могут перетачиваться несколько раз. Дальнейшее развитие конструкции режущих инструментов, оснащенных лезвийными сверхтвердыми материалами, идет по направлению расширения его возможностей и применения в условиях автоматизированного производства. Резцы из КНБ широко применяются для обработки деталей различной конфигурации на токарных, токарно-револьверных станках, станках расточной группы, а также на многоцелевых станках. Эффективное использование инструментов достигается на жестких высокоточных станках повышенной мощности. Такое оборудование должно обладать достаточной жесткостью, поскольку при точении и растачивании инструментами из композитов наблюдается относительно большие силы резания. Вибрации оборудования не допускаются, так как это не только ухудшает шероховатость обрабатываемой поверхности, но и в ряде случаев является причиной выкрашивания режущих кромок. Высокая стойкость и относительно малый износ инструментов из композитов имеют важное значение при обработке на автоматизированных токарных стан-

ках, так как число замен инструментов заметно сокращается, а заданные размеры обрабатываемой детали выдерживаются без частого вмешательства оператора. Если загрузка и выгрузка деталей осуществляется роботом, то инструменты, оснащенные модификациями КНБ, вполне пригодны для обработки в условиях безлюдной технологии. На рис. 41–43 представлены резцы, твердосплавные вставки, алмазный инструмент [5].



Рис. 41. Резец из новых материалов



Рис. 42. Твердосплавные вставки



Рис. 43. Алмазный инструмент

## 6.2. Покрытия для инструментов из СТМ

### 6.2.1. Металлические и композиционные покрытия

Ранее в отечественной и зарубежной практике инструмент изготовлялся преимущественно из порошков СТМ без металлических покрытий. В 1965 г. были разработаны технологический процесс и оборудование для химического метода металлизации порошков алмаза. Затем в 1969 г. был создан электролитический метод нанесения металлических покрытий с наложением ультразвуковых колебаний, применяемый до настоящего времени. В результате износостойкость инструмента при обработке твердого сплава повысилась в 2 раза по сравнению с работой кругом из алмазов без покрытия, а при шлифовании твердого сплава совместно со сталью – в 5–7 раз. Металлизированные порошки СТМ применяются при изготовлении инструмента всех видов и типоразмеров на металлических, металлокерамических и твердосплавных связках. Металлизации подвер-

гаются блочные высокопрочные и термостойкие марки алмазов – АС15, АС20, АС32, АС40, АС65, АС80, АС50Т, АС65Т, АС82Т, АС105Т, АС132Т, а также КНБ марок КР, ЛКВ и КТ (кибор) [5].

С 1983 г. при изготовлении инструмента используется новый технологический процесс для нанесения металлических покрытий методом ионно-плазменного напыления. Адгезия полученных с использованием магнетронов покрытий к поверхности СТМ значительно выше, чем у покрытий, полученных термовакuumным методом. Кроме того, в ионных покрытиях возникают напряжения сжатия, а в покрытиях, полученных испарением, – напряжения растяжения. Сжатие может достигать  $109 \text{ Н/м}^2$  для молибдена и вольфрама, что способствует лучшему удержанию зерен в инструменте, создает предпосылки для широкого использования данного метода нанесения покрытий на высокопрочные и термостойкие порошки алмазов и КНБ, предназначенных для изготовления инструмента, работающего в особо тяжелых условиях: при бурении и камнеобработке. В 1971 г. были созданы композиционные покрытия, включающие кроме металлической составляющей мелкозернистые порошки графита, гексагонального нитрида бора, дисульфида молибдена и некоторых карбидов тугоплавких металлов. Такие покрытия рекомендуются для сухого шлифования хрупких материалов. Введение антифрикционных добавок и твердых смазок способствует улучшению условий шлифования благодаря снижению тепловыделения в зоне обработки. В композиционных покрытиях сочетаются свойства материалов покрытия, абразивного порошка и твердой фазы включения, что повышает их физико-механические характеристики и улучшает шлифующую способность инструмента. Порошки СТМ с композиционными покрытиями применяются для изготовления инструмента всех видов и типоразмеров на органических связках. Покрытия наносятся в инертной среде и вакууме из расплава на сравнительно хрупкие порошки алмазов марок АС2, АС4, АС6 зернистостью 28/20 и крупнее неправильной формы с шероховатой поверхностью, применяемых в инструменте на органических связках. При торцевом шлифовании твердого сплава Т15К6 кругом 12А2 125×5×3 АС2 80/63 – Б1–100 % из алмазов с композиционным покрытием на основе сплава Cu–Sn–Ti при глубине 0,02 мм/дв. ход температура резания снижается по сравнению с металлическим покрытием только сплавом Cu–Sn–Ti на 150 °С; при 0,04 мм/дв. ход – на 200–250 °С, что весь-

ма важно при шлифовании без охлаждения, так как температура резания в кругах из алмазов, металлизированных этим сплавом, при глубине 0,04 мм/дв. ход достигает 600 °С и более. При этом кроме механических видов износа может происходить частичное окисление алмазов и термическое разрушение (деструкция) органической связки, что приводит к преждевременному износу алмазного инструмента. Введение твердых смазок позволяет в 1,5 раза снизить усилия резания. Эффективная мощность шлифования также снижается. Порошки СТМ с металлическим и композиционным покрытиями предназначены для изготовления инструмента на органических и металлических связках всех видов и типоразмеров на традиционном оборудовании и по существующим технологическим процессам. Особенностью процесса изготовления является уменьшение объема рабочего слоя связки или наполнителя на величину объема металла, вводимого в круг и равномерно распределенного на зернах СТМ. В настоящее время практически весь инструмент изготавливается из порошков СТМ с покрытиями и широко используется при обработке твердых сплавов, твердых сплавов совместно со сталью, при бурении, камнеобработке, обработке стекла, кремния и корунда, фарфора, ферритов, износостойких покрытий и других материалов. Таким образом, выбор метода и материала покрытий обусловлен физико-механическими свойствами существующих марок сверхтвердых и связующих материалов, а также условиями изготовления инструмента. Установлено, что нанесение покрытий существенно повышает свойства СТМ (разрушающую нагрузку и порог окисления зерен СТМ, смачивание и пропитку зерен связующими материалами, удержание зерен и теплоотвод). В результате существенно улучшаются физико-механические свойства связок, повышается работоспособность инструмента [5].

### ***6.2.2. Неметаллические покрытия***

Инструмент из металлизированных алмазов успешно применяется при обработке твердых и относительно хрупких материалов, например, при обработке твердого сплава, стекла, керамики, гранита и др. При обработке данным инструментом вязких материалов, особенно без применения СОТС (например, железоуглеродистых сплавов или твердого сплава совместно со сталью при наличии

между ними вязкого припоя), по сравнению с непокрытыми зернами уменьшается производительность обработки, зачастую повышается температура в зоне резания и, как следствие, образуются прижоги и другие дефекты на обработанной поверхности. КНБ, благодаря высокой термической устойчивости и химической инертности к железоуглеродистым сплавам, широко применяется при обработке различного вида сталей и, прежде всего, быстрорежущих. Инструмент из металлизированных порошков КНБ при обработке таких материалов имеет высокую износостойкость, однако при этом на обработанной поверхности могут образовываться прижоги, особенно при работе инструмента без применения СОТС. Поэтому покрытия, наносимые на зерна алмаза и КНБ, должны обеспечивать не только высокую износостойкость инструмента, изготовленного на их основе, но и высокое качество обработанной поверхности, а также повышать производительность шлифования при обработке вязких материалов. Для этого инструмент не должен засаливаться, должен работать в режиме самозатачивания, обеспечивать высокую мощность шлифования, определяемую фрикционными свойствами системы режущий инструмент – обрабатываемый материал. Этим требованиям удовлетворяет инструмент, изготовленный из порошков СТМ, с неметаллическими покрытиями на основе натриево-боросиликатных стекол. При работе инструмента в зоне резания, как правило, развиваются достаточно высокие температуры, превышающие температуру трансформации стекла ( $T_q$ ). Благодаря этому слой стекла, находящийся в контакте с обрабатываемым материалом, будут размягчаться. Размягченное стекло, являясь хорошей смазкой, способствует снижению температуры и мощности шлифования при обработке вязких материалов, а это, в свою очередь, повышает качество шлифуемой поверхности. Кроме того, стекла, в отличие от металлов, имеют невысокую адгезию к металлам, что препятствует схватыванию инструмента с обрабатываемым материалом. На основании проведенных исследований по смачиваемости и взаимодействию расплавов стекол с алмазом и КНБ выбраны составы стекол для покрытия порошков СТМ. Разработан способ нанесения стеклопокрытий на порошки СТМ из жидкой фазы. Он прост в исполнении, не требует сложного оборудования, защитных газовых сред или вакуума. По этому способу получают агрегаты, состоящие из 5–20 зерен СТМ, покрытых и связанных между собой адге-

зионно-активным стеклом. Использование порошков алмаза и КНБ со стеклопокрытиями позволяет придать инструменту новые положительные качества и, в первую очередь, снизить относительный расход абразива, а также температуру в зоне резания, мощность шлифования. Промышленные испытания работоспособности кругов в промышленных условиях показали, что круги из алмазов и КНБ со стеклопокрытием на органических и металлических связках могут эффективно использоваться в технологических процессах абразивной обработки цельнотвердосплавного и напайного твердосплавного инструментов, а также многолезвийных инструментов из быстрорежущих сталей при работе с охлаждением и без него. Применение алмазов и КНБ со стеклопокрытием позволяет повысить работоспособность абразивного инструмента по сравнению с СТМ без покрытия и покрытых металлами за счет снижения относительного расхода СТМ, повышения производительности шлифования, уменьшения прижогов на обрабатываемой поверхности, снижения мощности шлифования [5].

## Раздел 7. МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПОКРЫТИЯ

### 7.1. Классификация процессов нанесения металлических покрытий

В зависимости от требований, предъявляемых к эксплуатационным характеристикам деталей, различают три вида покрытий:

– *защитные покрытия*, назначением которых является защита от коррозии деталей в различных агрессивных средах, в том числе при высоких температурах;

– *защитно-декоративные покрытия*, служащие для декоративной отделки деталей с одновременной защитой их от коррозии;

– *специальные покрытия*, применяемые с целью придания поверхности специальных свойств (износостойкости, твердости, электроизоляционный, магнитных свойств и др.), а также восстановления изношенных деталей.

При выборе покрытий следует учитывать назначение и материал покрываемой детали, условия ее эксплуатации, свойства покрытия и способ его нанесения, допустимость контактов сопрягаемого металла и покрытия, а также экономическую целесообразность его применения. Процессы нанесения металлических покрытий классифицируются следующим образом:

**1. Горячее погружение в расплав** – один из самых старых методов нанесения покрытий. Металлы ванны имеют низкую температуру плавления – это цинк, олово, алюминий. Они обеспечивают защиту основного металла от коррозии.

**2. Напыление** осуществляется мелкими частицами материала, образующимися при пропускании проволоки или порошка через кислородно-ацетиленовое пламя, с последующим осаждением на холодную основу. Для нагрева используют электродуговую или плазменную металлизацию. Это способствует улучшению адгезии и снижению пористости покрытия.

**3. Наплавка** осуществляется сплавлением осаждаемого материала с поверхностным слоем основы. Наплавка широко применяется для ремонта отдельных деталей, поврежденных или износившихся в процессе эксплуатации. Для нанесения покрытий методом наплавки могут использоваться все основные сварочные процессы: газопламенный, электродуговой, плазменный, электроннолучевой и др.

**4. Электрохимическое осаждение** металлов из растворов солей обычно применяется для получения гальванических покрытий из хрома и никеля толщиной 0,12–0,60 мм.

**5. Электролитическое нанесение покрытий** из сплавов Ni–P и Ni–B осуществляется вследствие химического взаимодействия. В этом случае покрытия формируются по всей поверхности деталей с одинаковой скоростью толщиной до 0,12 мм, тогда как гальванические покрытия, прежде всего формируются на выступающих местах – кромках, ребрах, гранях.

**6. Химико-паровое осаждение**, или процесс CVD (chemical vapour deposition), является процессом, в котором устойчивые продукты реакции зарождаются и растут на подложке в среде с протекающими в ней химическими реакциями (диссоциация, восстановление и др.). Благодаря высокой температуре на поверхности образуются очень тонкие слои, например карбида или нитрида титана. CVD-процесс используется для нанесения покрытий на инструмент и штампы.

**7. Физическое осаждение из паровой фазы** (physical vapour deposition, PVD) протекает в несколько стадий:

- 1) нагрев материала в вакууме до испарения;
- 2) перенос паров от источника к подложке;
- 3) конденсация паров на основе – подложке.

Метод PVD обладает высокой гибкостью, и с его помощью можно наносить любые металлы, сплавы, оксиды, карбиды и нитриды. Например, его с успехом применяют для нанесения износостойкой пленки TiN на стальной инструмент. Достоинством метода PVD является высокая чистота поверхности и превосходная связь с основой.

**8. Механическое нанесение покрытий** используют для получения цинковых, кадмиевых и оловокадмиевых покрытий – детали перемешивают в сосудах с соответствующими тонкими металлическими порошками, активаторами и стеклянными шариками.

**9. Ионная имплантация** предусматривает ионизацию атомов с последующим ускорением ионов в электрическом поле в вакууме. Ионы тормозятся при соударении с мишенью и распределяются по глубине мишени. Хотя глубина проникновения ионов обычно не превышает 0,1–0,2 мкм, свойства металла могут меняться существенно.

## 7.2. Металлические покрытия

**Цинковые покрытия.** Среди методов, улучшающих антикоррозионные свойства, цинкование занимает первое место. Ежегодно в мире оцинковывается около 25 млн т стали.

Основными методами для нанесения цинковых покрытий на сталь являются электролитический и погружение в расплав (огневое или горячее цинкование). Хотя в качестве материала основы можно использовать любые марки, для цинкования обычно применяют углеродистые и низколегированные стали. Цинковые покрытия характеризуются коррозионной стойкостью в атмосферных условиях, в пресной воде и в закрытых помещениях с умеренной влажностью. Цинковые покрытия имеют удовлетворительную поверхностную твердость, износо- и водостойкость, прочность на изгиб. Долговечность оцинкованных труб зависит от толщины покрытия. Для серийно выпускаемых труб на  $1 \text{ м}^2$  расходуется 400 г цинка, толщина покрытия составляет 43–46 мкм. Отечественная промышленность выпускает оцинкованные водогазопроводные трубы диаметром 10–159 мм, длиной до 8 м. Скорость коррозии оцинкованных труб в 3–4 раза ниже, чем у стальных труб без покрытия в одних и тех же агрессивных средах. Для повышения коррозионной стойкости оцинкованных листов в состав цинкового покрытия вводят медь (0,08–0,82 %) и алюминий (до 1 %). Коррозионная стойкость листов с электролитическим покрытием ниже, чем горячеоцинкованных. Для повышения коррозионной стойкости оцинкованного листа его дополнительно покрывают лакокрасочным или цветным полимерным покрытием. Цинковые покрытия применяют для защиты от коррозии запорной арматуры и подземных трубопроводов сточной воды и воды, используемой для технических целей. Соединения цинка токсичны и при нагреве неустойчивы в кислотах. Цинковые покрытия не применяют для защиты от коррозии деталей, находящихся в непосредственном контакте с пищевыми продуктами.

**Алюминиевые покрытия.** Для стальных деталей с алюминиевым покрытием характерно сочетание высокой прочности и коррозионной стойкости. Нанесение покрытий производят путем горячего алюминирования в расплавах (алитирование), плакированием стальных листов и напылением в вакууме. Среди способов покрытия стальных листов алюминием наибольшее распространение имеет горячее

алюминирование. Коррозионная стойкость стальных деталей с алюминиевым покрытием обусловлена высокими защитными свойствами образующейся на поверхности пленки  $Al_2O_3$  толщиной менее 0,1 мкм. Этот оксидный слой отличается высокой плотностью и при повреждении быстро образуется заново. Защитное действие пленки оксида алюминия на алюминиевом покрытии особенно сильно выражено при высокотемпературном нагреве.

Алюминиевые покрытия устойчивы в водных растворах агрессивных пищевых сред и органических кислот. Нетоксичность, инертность ко многим средам, хорошие грунтовочные свойства для последующего нанесения полимерных и стеклоэмалевых покрытий обуславливают достаточно широкое применение алюминиевых покрытий в разных отраслях машиностроения.

**Оловянные и хромсодержащие покрытия.** Покрытие оловом производят методами погружения в расплав и электролитическим осаждением. При погружении стальных и чугунных изделий в расплав на поверхности образуется тонкий слой соединения  $FeSn_2$ , над которым после вытягивания из расплава затвердевает более толстый слой олова. Более широко используют метод электролитического лужения. Листовой прокат, полученный этим методом, толщиной менее 0,5 мм, называют белой жестию. Толщина оловянных покрытий составляет 30–35 мкм.

В качестве заменителя белой жести применяется холоднокатаный тончайший лист, который покрыт электролитически нанесенным покрытием оксида хрома. Оловянные покрытия широко применяются в различных отраслях техники, прежде всего в пищевой и мясомолочной промышленности, особенно для защиты от коррозии различных стальных емкостей типа баков, цистерн, фляг. Оловом защищают не только стальные, но и медные емкости. Электролитически хромированную жестию используют вместо белой жести при изготовлении упаковочной тары для консервов (овощных, молочных, мясных, рыбных), а также фруктовых соков, пива, безалкогольных напитков, при производстве крышек для стеклотары и колпачков для бутылок, тары для упаковки сухих пищевых продуктов.

**Покрытия плакированием.** При плакировании происходит послойное соединение стали с одним или многими металлами с образованием многослойного материала. При плакировании к материалу

основы не предъявляется особых требований, он используется с теми же свойствами, которые нужны для эксплуатации.

Для получения бездефектного соединения требуется очистка поверхности и создание заданной шероховатости. Плакирование осуществляется разными методами. Используют процессы горячей и холодной прокатки, метод двухслойного литья заготовок, плакирование взрывом и наплавку плакирующего слоя. В качестве материала для плакирования низколегированных сталей применяют коррозионностойкие ферритные или аустенитные стали, медь и никель или их сплавы, а также алюминий, титан, ниобий или молибден.

При плакировании коррозионностойкой сталью предварительно создают гальваническое никелевое покрытие. Этим устраняется окисление горячей стали перед прокаткой и одновременно интенсифицируются процессы диффузионного сваривания, необходимые для сцепления материалов. Биметаллы являются не только заменителями однородных дорогостоящих материалов. Во многих случаях благодаря сочетанию свойств своих компонентов они имеют более благоприятные показатели, чем однородные дорогостоящие материалы сами по себе.

Плакированные изделия отличаются более высокой прочностью. При использовании в качестве основного материала сталей с высоким пределом текучести может быть снижена масса изделия и получена дополнительная экономия металла по сравнению с требуемым количеством при изготовлении тех же изделий целиком из нержавеющей сталей.

***Покрyтия, полученные осаждением в вакууме или из газовой фазы.*** При осаждении металлов из газовой фазы на стальную поверхность используют свойство некоторых металлов легко образовывать летучие галогениды, которые вступают в реакцию с железом на стальной поверхности. При этом металл покрытия становится свободным и может диффундировать вглубь стальной детали. Наряду с алюминием для осаждения из газовой фазы используется также хром и кремний. Высокое содержание хрома на поверхности (до 25 %) придает материалу отличную стойкость против окисления и коррозии.

### **7.3. Неметаллические покрытия**

#### ***7.3.1. Неорганические покрытия***

К неорганическим неметаллическим материалам, применяемым для защиты от коррозии металлических поверхностей, относятся эмали, стекло и цемент. Эмалью называют стекловидную застывшую массу, полученную в результате полного или частичного расплавления и состоящую в основном из кварца и других оксидов.

Стеклоэмалевое покрытие обладает не только высокой химической стойкостью, износостойкостью, но и обеспечивает незначительное налипание остатков продукта, благодаря чему аппаратура легко моется. Покрытие имеет высокую адгезию к металлу. Общая толщина эмалевого покрытия 0,8–1,0 мм. При эксплуатации эмалированной аппаратуры не допускается превышать давление или резко повышать его даже в пределах рабочего давления, резко нагревать и заполнять переохлажденным продуктом или водой, производить местные термические и механические воздействия, оставлять аппараты открытыми, использовать в качестве моющих и дезинфицирующих средств щелочные растворы. Недостатки стеклоэмалевых покрытий: чувствительность к ударам, резкой смене температуры, местным перегревам, воздействию щелочей.

Высокую долговечность водопроводных труб обеспечивают цементные покрытия. Для покрытий используется портландцемент с наполнителем в виде мелкого песка.

#### ***7.3.2. Органические полимерные покрытия***

Полимерные покрытия не только защищают металлы от воздействия агрессивных сред, но и повышают их износостойкость, снижая прилипаемость различных веществ к рабочим поверхностям, позволяют экономить цветные металлы и другие дефицитные материалы.

В различных областях промышленности для защиты внутренних поверхностей аппаратов, трубопроводов и арматуры применяются винилхлоридные, фторопластовые, пентапластовые, полиолефиновые, полиуретановые, феноло-формальдегидные, кремнийорганические, каучуковые, эпоксидные и другие покрытия.

**Полиолефиновые покрытия.** К наиболее распространенным полиолефинам относятся полиэтилен, полипропилен и их сополимеры. Покрытия из полиолефинов отличаются высокой химической стойкостью к действию многих агрессивных сред. Полиэтилен используют в качестве упаковочного материала для хранения продуктов и получения антикоррозионных покрытий. Свойства полиэтилена и полипропилена практически не меняются при воздействии концентрированными соляной и серной кислотами при 20 °С, а также растворами щелочей. Однако органические растворители при комнатной температуре вызывают некоторое набухание, а при температурах выше 100–120 °С растворяют полиолефины.

Полиолефины имеют низкую проницаемость по отношению к жидким и газообразным агрессивным средам.

Полиолефины используются для нанесения покрытий почти всеми известными методами, включая напыление порошкообразных полимеров, плакирование пленками и листами, футерование литьем под давлением, а также формирование покрытий из дисперсий в водно-органических средах.

**Полиамиды.** К полиамамдам относятся капрон и капролон. Покрытия из полиамидов обладают высокими антифрикционными характеристиками. По износостойкости при сухом и жидкостном трении полиамиды превосходят не только другие классы полимеров, но и многие металлы, применяющиеся в антифрикционных целях. Низкий коэффициент трения при высоких нагрузках позволяет использовать полиамиды в тяжело нагруженных узлах трения, о чем свидетельствуют значения коэффициентов трения покрытий из полиамидов при трении со смазкой по стали. Недостатком полиамидных покрытий является склонность к старению и значительное водопоглощение. С повышением температуры гигроскопичность возрастает.

Полиамидные покрытия наносят на поверхность изделий напылением порошков, литьем под давлением, а также из растворов. Следует отметить низкую стойкость полиамидов к окислению, что препятствует длительной эксплуатации полиамидных покрытий на воздухе при температурах выше 60–100 °С. В целях повышения термостабильности полиамидов применяют различные стабилизирующие добавки органического и минерального происхождения. Для улучшения адгезионных и когезионных свойств, повышения эксплуатационных характеристик в покрытия из полиамидов вводят

различные наполнители. Введение небольших количеств оксидов титана, меди, железа, свинца и алюминия способствует росту прочности и твердости, несущей способности и износостойкости покрытий при незначительном изменении коэффициента трения. Повышение теплостойкости и несущей способности подшипников с полиамидными покрытиями достигается введением порошков металлов (алюминия, свинца, бронзы и др.). Снижению коэффициента трения также способствует добавка фторопласта-4, дисульфида молибдена, графита.

Модифицированные покрытия на основе полиамидных слоев применяют для изготовления таких деталей как шестерни, подшипники и т. д. Полиамидные смолы используют для получения защитных покрытий, а полиамидные порошки – для нанесения тонкого антифрикционного износостойкого покрытия.

**Поливинилхлорид (ПВХ).** Благодаря низкой стоимости сырья, высокой химической стойкости, хорошим физико-механическим и удовлетворительным электрическим свойствам, ПВХ является самым распространенным материалом, применяющимся для создания защитно-декоративных, химически стойких и электроизоляционных покрытий.

В состав поливинилхлоридных композиций, предназначенных для покрытий, помимо пластификаторов, входят стабилизаторы, наполнители, смазки, пигменты и другие добавки, концентрация и природа которых оказывают существенное влияние на свойства покрытий.

Материалом для покрытий в основном служит пластифицированный поливинилхлорид, реже используется непластифицированный ПВХ, типичным представителем которого является винипласт. Листовой и пленочный винипласт применяются в химической промышленности для футеровки металлической аппаратуры и трубопроводов, эксплуатирующихся в агрессивных средах.

Пластифицированный поливинилхлорид обычно наносят на поверхность обрабатываемых деталей в виде порошка или пленки.

Высокая химическая стойкость поливинилхлорида позволяет успешно использовать покрытия на его основе в агрессивных средах.

Поливинилхлорид является основным компонентом для изготовления лакокрасочных материалов. Путем обработки ПВХ получают винипласт, листы которого легко поддаются механической обработке и хорошо свариваются. Это позволяет использовать их для нанесения сплошного покрытия на фундаменты, цокольные части

и другие конструкции. Поливинилхлоридный пластикат применяют как обкладочный материал для защиты аппаратуры от коррозии, устройств полов в помещениях, где требуется герметичность. Для устройства химически стойких полов, а также для гидроизоляции используют поливинилхлоридную пленку.

**Пентапласт** обладает высокой водостойкостью, прочностью, низким коэффициентом трения по стали. Он стоек к воздействию грибковой плесени, устойчив к воздействию растворов щелочей, кислот и солей.

Пентапласт наносят на поверхность защищаемых изделий в порошкообразном виде и из дисперсий в органических средах. Кроме того, производится защита изделий футеровочными листами и готовыми вкладышами из пентапласта.

**Фторопласты.** Для изготовления различных деталей и для защитных покрытий применяются фторопласт-4 и фторопласт-3. Фторопластовые покрытия исключительно устойчивы к агрессивным средам и в этом отношении превосходят даже благородные металлы и сплавы. На покрытия из фторопласта-4 не действуют окислительные среды, включая и царскую водку, кипящие щелочи, растворы солей. Фторопластовые покрытия вполне устойчивы по отношению к жирам, маслам, влаге, кислотам и т. д.

Покрытия из фторопластов применяют для защиты различных технологических емкостей.

**Кремнийорганические полимеры** отличаются многими ценными свойствами, из которых наиболее характерны термостойкость, а также стойкость к воздействию целого ряда химических агентов и растворителей. По термостойкости они значительно превосходят органические полимеры.

Кремнийорганические полимеры сравнительно инертны по отношению к большинству реагентов за исключением сильных оснований и концентрированных кислот. Разбавленные сильные кислоты и щелочи, а также слабые кислоты и основания оказывают на них незначительное действие.

К недостаткам кремнийорганических полимеров следует отнести их невысокую химическую стойкость к действию органических растворителей и окислительных сред.

**Эпоксидные смолы** в своем составе имеют реакционноспособные эпоксидные и гидроксильные группы, способные вступать в хими-

ческие реакции с различными веществами с образованием более сложных соединений. При введении в них отвердителей холодного или горячего отверждения такие смолы способны переходить в неплавкое и нерастворимое состояние. В качестве отвердителей могут применяться органические и неорганические кислоты, ангидриды кислот, амины и амиды, а также синтетические смолы.

Свои ценные физико-механические свойства эпоксидные смолы приобретают при взаимодействии с отвердителями. Отвердители аминного типа выполняют функции сшивающих реагентов. Реакционноспособные группы отвердителей взаимодействуют с эпоксидными группами смолы. Скорость процесса отверждения зависит от температуры. Некоторые отвердители реагируют со смолой при комнатной температуре, другие – лишь при нагревании. Наиболее полное отверждение полиаминами достигается при температуре выше 100 °С. Долговечность материалов, полученных отверждением при комнатной температуре, ограничена. Материалы, полученные отверждением эпоксидной смолы при нагревании, более долговечны.

На основе эпоксидных смол изготавливают лакокрасочные материалы, применяемые для защитных покрытий.

Покрытия на основе эпоксидных смол с такими наполнителями, как уголь, графит, кремнезем, кварцевая мука, измельченный мрамор, в пищевой промышленности использовать нельзя по санитарным нормам.

Для защиты сепараторов перспективны комплексные покрытия, состоящие из одного слоя грунта, двух слоев эмали и одного слоя лака на основе эпоксидной смолы. Отвержденное покрытие промывается раствором уксусной кислоты, затем раствором соды и ополаскивается водой. Полимерные покрытия на основе виниловых, каучуковых и эпоксидных смол применяются для защиты сепараторов, в которых технологические процессы протекают под избыточным давлением.

Для защиты некоторых железобетонных (бетонных) внутренних поверхностей стационарных баков используют эпоксидное покрытие, состоящее из 82 % смолы, 13 % этилового спирта и 5 % полиэтиленполиамина. Покрытие затвердевает при комнатной температуре, но для ускорения процесса повышают температуру до 70 °С. Перед нанесением покрытия железобетонная поверхность обязательно должна быть хорошо очищена, просушена и прогрета электрообогревателем любого типа. Покрытие четырехслойное, общей толщи-

ной до 0,6–0,8 мм. Эпоксидные смолы также используют для защиты внутренней поверхности железных чанов и цистерн.

Для защиты железобетонных емкостей, применяемых для хранения пищевых продуктов, используют трехслойное эпоксидное покрытие: первый слой грунта и два покровных слоя. Сушка каждого слоя осуществляется в воздушно-сухих условиях в течение 24 ч с последующей сушкой всех трех слоев в течение 28 суток. Высушенное покрытие промывают раствором соды с последующим ополаскиванием.

**Резиновые покрытия.** В качестве материалов для покрытий применяются резины на основе натурального и синтетических каучуков. В состав композиций входят стабилизаторы, вулканизирующие агенты и другие добавки. В процессе вулканизации образуется трехмерная структура, обеспечивающая покрытиям хорошие механические свойства.

Для футеровки изделий простой формы используют листовые материалы из сырой резины с последующей вулканизацией на подложке. Для защиты изделий сложной конфигурации находят применение жидкие материалы в виде дисперсий или растворов.

Высокой эластичностью и хорошими адгезионными свойствами обладают покрытия из резин на основе натурального каучука, которые используются для защиты от минеральных кислот и щелочей.

Мягкие резины в основном применяются для покрытия различных аппаратов, деталей, цистерн, труб. Они представляют собой полимерные композиции сложного состава на основе эластомеров линейного или разветвленного строения (каучуков) в виде латексов или клеев.

Например, для футеровки емкостей внутреннюю поверхность подвергают дробеструйной обработке и оклеивают листовой смесью резины с феноло-формальдегидной смолой. После этого поверхность облицовывают кислотоупорной плиткой на диабазовой замазке.

Разработку теплостойких резин ведут с учетом специфики свойств агрессивных сред. Наибольший интерес представляют жидкие силоксановые каучуки, которые обладают высокой теплостойкостью (до 250 °С) и нетоксичны.

Благодаря высокой сопротивляемости истиранию резины применяют для аппаратов, работающих с жидкостями, содержащими взвешенные вещества (насосы, трубопроводы). Иногда применяют твердые резины – эбониты. Эбониты по сравнению с резинами имеют более высокую химическую стойкость.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Экспериментальное исследование характеристик некоторых композитных материалов / М. Э. Арделеану, Д. Г. Стэнеску, В. Адам [и др.] // Международная конференция по электромеханическим и энергетическим системам (SIELMEN). – Крайова, 2019. – С. 1–4. – URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8905899> (дата обращения: 31.01.2025).

2. Грудницкий, С. Болотов рассказал курсантам Университета МЧС о достижениях отечественных промышленных предприятий / С. Грудницкий // SB. BY. Беларусь Сегодня. – URL: <https://www.sb.by/articles/bolotov-rasskazal-kursantam-ugz-o-dostizheniyakh-otechestvennykh-promyshlennykh-predpriyatiy.html>. – Дата публ.: 16.12.2022.

3. Манова, С. С. Аддитивные технологии в моде и дизайне / С. С. Манова // Молодежная наука – первый шаг в науку большую : сб. ст. V Междунар. науч.-практ. конф., Петрозаводск, 13 нояб. 2023 г. – Петрозаводск, 2023. – С. 176–179. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54816391> (дата обращения : 31.01.2025).

4. Токарева, Ю. Аддитивные технологии и их возможности / Ю. Токарева // Тренды. Радио РБК. – URL: <https://trends.rbc.ru/trends/futurology/6284222d9a79472c8b9a67bc> (дата обращения: 31.01.2025).

5. Рогов, В. А. Новые материалы в машиностроении : учебное пособие / В. А. Рогов, В. В. Соловьев, В. В. Копылов. – М. : Рос. ун-т дружбы народов, 2008. – 342 с. – URL: <https://files.core.ac.uk/download/pdf/542423539.pdf> (дата обращения: 31.01.2025).

6. Рогов, В. А. Современные машиностроительные материалы и заготовки : учебное пособие / В. А. Рогов, Г. Г. Позняк. – М. : Академия, 2008. – 329 с. – URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01003442181> (дата обращения: 31.01.2025).

7. Пирайнен, В. Ю. Материаловедение художественной обработки : учебник / В. Ю. Пирайнен ; под ред. Ю. П. Солнцева. – СПб. : Химиздат, 2008. – 478 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01004157262> (дата обращения: 31.01.2025).

8. Пасютина, О. В. Материаловедение : учебное пособие. – 2-е изд., испр. / О. В. Пасютина. – Мн. : РИПО, 2020. – 264 с. – URL: <https://ibooks.ru/bookshelf/372051/reading> (дата обращения: 30.10.2025).

9. Зарифжонов, Ж. Ф. Материалы с памятью формы / Ж. Ф. Зарифжонов // Инновационные научные исследования: теория, методология, тенденции развития : сб. науч. ст. по материалам VI Междунар. науч.-практ. конф., Уфа, 19 нояб. 2021 г. – Уфа, 2021. – С. 38–41. – URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=47351099> (дата обращения: 30.10.2025).

10. Romanski, A. Ball-milled Fe-Ni and Fe-Mn matrix powders for sintered diamond tools / A. Romanski, J. Konstanty // Archives of metallurgy. – 2014. – Vol. 59. – P. 189–193. – URL: [https://www.imim.pl/files/archiwum/Vol11\\_2014/30.pdf](https://www.imim.pl/files/archiwum/Vol11_2014/30.pdf) (дата обращения: 01.11.2025).

11. Специальное материаловедение : учебное пособие / А. А. Шевцов, О. А. Бондаренко, В. Я. Черных [и др.]. – СПб. : ГИОРД, 2007. – 260 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003129918> (дата обращения: 01.11.2025).

12. Серов, М. М. Материаловедение : учебное пособие / М. М. Серов, В. А. Васильев. – М. : Рос. гос. технол. ун-т, 2006. – 424 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003036943> (дата обращения: 01.11.2025).

13. Современные и перспективные конструкционные материалы : сб. учебно-методических материалов / сост. : В. В. Нецименко, В. В. Соловьев. – Благовещенск : Амур. гос. ун-т., 2017. – 213 с. – URL: [https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU\\_Edition/9531.pdf](https://irbis.amursu.ru/DigitalLibrary/AmurSU_Edition/9531.pdf) (дата обращения: 01.11.2025).

14. Варавка, В. Н. Машиностроительные материалы : учебное пособие / В. Н. Варавка, Г. И. Бровер, Л. Д. Дьяченко. – Ростов н/Д. : Донской гос. технический ун-т, 2006. – 142 с. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01002956273> (дата обращения: 01.11.2025).

15. Наноматериал // Рувики. – URL: <https://ru.ruwiki.ru/wiki/Наноматериал> (дата обращения: 02.11.2025).

16. Щербаков, А. С. Разработка высокопрочных композитов на основе эпоксидных и полиэфирных смол, армированных стеклянными, базальтовыми волокнами и углеродными нанотрубками : дис. ... канд. техн. наук : 2.6.11 / Щербаков Андрей Сергеевич; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю. А. – Саратов, 2023. – 168 л. – URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01012310252> (дата обращения: 02.11.2025).

17. Технологии конструкционных наноструктурных материалов и покрытий / под ред. Г. В. Малахова, П. А. Витязя, К. А. Солнцева. –

Мн. : Белорусская наука, 2011. – 284 с. – URL: <https://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=142364> (дата обращения: 30.10.2025).

18. Когда углерод становится наноуглеродом. Богатое семейство углеродных материалов? // Нанометр. – URL: [http://www.nanometer.ru/2017/12/10/15129119409819\\_528293.html](http://www.nanometer.ru/2017/12/10/15129119409819_528293.html) (дата обращения: 02.11.2025).

19. Порошковая металлургия: технология, исходные материалы, конечная продукция и ее применение // НПК «Метотехника». – URL: [https://www.metotech.ru/articles/art\\_poroshki\\_4.pdf](https://www.metotech.ru/articles/art_poroshki_4.pdf) (дата обращения: 02.11.2025).

20. Порошковые материалы и области их применения // НПК «Метотехника». – URL: [https://www.metotech.ru/art\\_poroshki\\_7.htm](https://www.metotech.ru/art_poroshki_7.htm) (дата обращения: 02.11.2025).

21. Хренов, О. В. Материалы и технология порошковой металлургии / О. В. Хренов, Л. Н. Афанасьев, А. В. Лешок. – Мн. : БНТУ, 2010. – 37 с. – URL: [https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/828/Materialy\\_i\\_tekhnologiya\\_poroshkovo\\_j\\_metallurgii.pdf](https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/828/Materialy_i_tekhnologiya_poroshkovo_j_metallurgii.pdf) (дата обращения: 02.11.2025).

22. Фельдштейн, Е. Э. Обработка материалов и инструмент : учебное пособие / Е. Э. Фельдштейн, М. А. Корниевич, М. И. Михайлов. – Мн. : Новое знание, 2009. – 317 с. – URL: <https://e.lanbook.com/book/2928> (дата обращения: 30.10.2025).

Учебное издание

**ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ НОВЫХ  
МАТЕРИАЛОВ В МАШИНОСТРОЕНИИ**

Пособие

для обучающихся по специальности

7-06-0714-02 «Инновационные технологии в машиностроении»,  
профилизация «Аддитивные и субтрактивные технологии»

С о с т а в и т е л и:

**ФОМИХИНА** Ирина Викторовна

**ШЕЛЕГ** Валерий Константинович

Редактор *А. С. Кочмарик*

Компьютерная верстка *Н. А. Школьниковой*

Подписано в печать 13.03.2026. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 6,57. Уч.-изд. л. 5,25. Тираж 100. Заказ 458.

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.