



КОМПЛЕКС ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ  
И ИМУЩЕСТВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ  
ПРАВИТЕЛЬСТВА МОСКВЫ



ДЕПАРТАМЕНТ ИНВЕСТИЦИОННОЙ  
И ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ  
ГОРОДА МОСКВЫ

**АПР**

АГЕНТСТВО  
ПРОМЫШЛЕННОГО  
РАЗВИТИЯ МОСКВЫ

# НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ

в промышленности

Москва | 2020 год

## СОДЕРЖАНИЕ

Основные термины и определения.....	4-5	СОСТАВ (СТРУКТУРА) ТЕХНОЛОГИИ И КЛАССИФИКАЦИЯ.....	28-32
Введение.....	6-7	Композиционные материалы.....	28
История.....	8-9	Умные материалы.....	48
ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ.		Металлические порошки.....	48
ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ.....	10-27	ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЕХНОЛОГИИ.....	34-35
Композиционные материалы.....	10	Композиционные материалы.....	34
Полимерные композиционные материалы.....	10	Умные материалы.....	34
Композитные материалы с металлической матрицей.....	15	Металлические порошки.....	34
Керамические композитные материалы.....	16	ОСНОВНЫЕ ТРЕНДЫ.....	36-38
Умные материалы.....	18	ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ.....	40-70
Аэрогель.....	19	Композиционные материалы.....	40
Материалы с памятью формы.....	20	Авиастроение.....	40
Высокотемпературные сверхпроводники.....	20	Ракетостроение.....	42
Стекло с редкоземельными металлами.....	21	Судостроение.....	45
ДНК – коробочки.....	21	Вагоностроение.....	47
Метаматериалы.....	22	Автомобилестроение.....	48
Гидрофобные покрытия.....	23	Строительство.....	50
Биоразлагаемые материалы.....	23	Производство режущего инструмента.....	53
Перовскит.....	24	Умные материалы.....	53
Металлопорошковые материалы для аддитивного производства.....	25	Применение умных материалов.....	53
Методы получения металлических порошковых материалов для аддитивных технологий.....	25		

Конструкционные материалы.....	61
Неразрушающий контроль.....	63
Спортивный инвентарь.....	66
Медицина.....	66
Приборостроение.....	66
Металлические порошки для аддитивного производства.....	67
Медицина.....	68
Авиационно-космическая промышленность.....	69
Автомобилестроение.....	70
 ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	 72-76
Применение композитных материалов как драйвер отраслей ОПК.....	72
Аэрогель для сбора космической пыли.....	72
Новый бетон с добавкой графена стал на 150% прочнее обычного.....	73
Применение графена для защиты от бактериальной коррозии.....	74
Графеновая пена выдерживает нагрузку в 3000 раз больше собственного веса.....	74
Применение графена для производства аккумуляторных батарей.....	74
Использование композитов в строительстве мостов.....	75

Лопасты ветрогенераторов из углеродного волокна вместо стекловолокна.....	75
Использование металлопорошка и аддитивных технологий в производстве.....	76
<b>КООПЕРАЦИОННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПОЧКИ.....</b>	<b>78</b>
<b>ОСНОВНЫЕ ПОСТАВЩИКИ И ПРОИЗВОДИТЕЛИ.....</b>	<b>80-86</b>
Мировые компании.....	80
Российские компании.....	83
Московские компании.....	84
 ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	 88
ПЕРЕЧЕНЬ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ.....	90

## ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

- CVDметод**  
(англ. chemical vapor deposition)  
Химическое осаждение из газовой фазы процесс, используемый для получения высокочистых твёрдых материалов.
- MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output)**  
Метод пространственного кодирования сигнала, позволяющий увеличить полосу пропускания канала, в котором передача данных и прием данных осуществляются системами из нескольких антенн.
- RTM-технология (англ. resin transfer molding)**  
Метод инъекции ненасыщенной полиэфирной смолы в закрытую форму.
- Аддитивное производство**  
Группы технологических методов производства изделий и прототипов, основанных на поэтапном формировании изделия путём добавления материала на основу.
- Адсорбция**  
Самопроизвольный процесс увеличения концентрации растворённого вещества у поверхности раздела двух фаз вследствие нескомпенсированности сил межмолекулярного взаимодействия на разделе фаз.
- Актуатор**  
Функциональный элемент системы автоматического управления, который воздействует на объект управления, изменяя поток энергии или материалов, которые поступают на объект.
- Акустическая эмиссия**  
Техническая диагностика, основанная на явлении возникновения и распространения упругих колебаний (акустических волн) в различных процессах, например, при деформации напряжённого материала, истечении газов, жидкостей, горении и взрыве и др.
- Анизотропия**  
Различие свойств среды (например, физических) в различных направлениях внутри этой среды; в противоположность изотропии.
- Биорезорбируемые материалы**  
Материалы, которые по мере растворения замещаются тканью организма с образованием нетоксичных продуктов растворения.
- Болометр**  
Тепловой приёмник излучения, чаще всего оптического, а именно — инфракрасного диапазона.
- Вейвлет**  
Математическая функция, позволяющая анализировать различные частотные компоненты данных.
- Гидрофобность**  
Физическое свойство молекулы, «стремление» избежать контакта с водой.
- ГИП (горячее изостатическое прессование)**  
В материаловедении метод соединения двух металлов.
- Графен**  
Двумерная аллотропная модификация углерода, образованная слоем атомов углерода толщиной в один атом.
- Десорбция**  
Процесс, обратный адсорбции.
- Диполь**  
Идеализованная система, служащая для приближённого описания поля, создаваемого более сложными системами зарядов, а также для приближённого описания действия внешнего поля на такие системы.
- Диспергирование**  
Тонкое измельчение твёрдых тел или жидкостей, в результате чего получают порошки, суспензии, эмульсии.
- Дисперсность**  
Физическая величина, характеризующая размер взвешенных частиц в дисперсных системах. Это величина, показывающая какое число частиц можно уложить в плотную в одном кубическом метре.
- Диссоциация**  
Распад сложных химических соединений на составляющие компоненты и/или элементы.
- Искусственный интеллект**  
Свойство интеллектуальных систем выполнять творческие функции, которые традиционно считаются прерогативой человека.
- Кантилевер**  
Устоявшееся название наиболее распространенной в сканирующей атомно-силовой микроскопии конструкции микро-механического зонда.
- Кермет**  
Искусственный материал, представляющий собой гетерогенную композицию металлов или сплавов с неметаллами (керамикой).
- Красностойкость**  
Характеристика жаропрочности стали, обозначающая способность стали сохранять при нагреве до температур красного каления высокую твёрдость и износостойкость, полученные в результате термической обработки.

**МГД-генератор****(Магнитогидродинамический генератор)**

Энергетическая установка, в которой энергия рабочего тела (жидкой или газообразной электропроводящей среды), движущегося в магнитном поле, преобразуется непосредственно в электрическую энергию.

**Мемристор**

Пассивный элемент в микроэлектронике, способный изменять своё сопротивление в зависимости от протекшего через него заряда (интеграла тока за время работы).

**Метаматериал**

Искусственный композитный структурированный материал, электромагнитные свойства которого существенно отличаются от свойств компонентов, входящих в его состав, и определяются особым упорядочением и структурой компонентов (кольцеподобной, рулонной, проводной и т. д.).

**Микролит**

Очень редкий минерал класса оксидов. В переводе с греческого языка слово «micro» означает малый, а слово «lithos» — камень. Название минерала связано с маленьким размером зерен. Используется искусственный минерал на основе очень мелких (порядка микронов) зёрен корунда с небольшой добавкой связывающего стеклообразного материала.

**Нитинол**

Интерметаллид, соединение титана и никеля, в процентном соотношении 45 % (титан) — 55 % (никель) и с равным количеством атомов каждого вещества.

**Нульмерные наполнители**

Наполнители для композитов, размеры которых в трех измерениях имеют один и тот же порядок. К таким наполнителям

относят дисперсные (преимущественно порошковые) наполнители (сажа, песок, мелкодисперсные металлы, фосфаты, стеклянные и кремнеземные микросферы и т. д.).

**Отжиг**

Вид термической обработки, заключающийся в нагреве до определённой температуры, выдержке в течение определённого времени при этой температуре и последующем, обычно медленном, охлаждении до комнатной температуры.

**ПВХ (Поливинилхлорид)**

Бесцветная, прозрачная пластмасса, термопластичный полимер винилхлорида.

**Пултрузия**

Технология изготовления высоконаполненных волокном композиционных деталей с постоянной поперечной структурой. Используется в производстве полимерных композиционных материалов.

**Пьезокерамика**

Искусственный материал, обладающий пьезоэлектрическими и сегнетоэлектрическими свойствами, имеющий поликристаллическую структуру.

**Пьезоэлектричество**

Эффект продуцирования веществом (кристаллом) электрической силы при изменении формы.

**Редкоземельные элементы**

Группа из 18 элементов, включающая скандий, иттрий, лантан и лантаноиды (церий, празеодим, неодим, прометий, самарий, европий, гадолиний, тербий, диспрозий, гольмий, эрбий, тулий, иттербий, лютеций).

**Реологические свойства**

Деформационные свойства материалов (твёрдых, жидких

или газообразных) вне зависимости от того, из каких субъединиц (компонент) они состоят.

**Сверхзвуковая скорость**

Скорость частиц вещества выше скорости звука или распространения волны сжатия, для данного вещества, или скорость тела движущегося в веществе с более высокой скоростью, чем скорость звука для данной среды.

**Сополимеры**

Разновидность полимеров, цепочки молекул которых (макромолекулы) состоят из двух или более различных структурных звеньев.

**Сорбция**

Поглощение твёрдым телом либо жидкостью различных веществ из окружающей среды.

**Старение материалов**

Медленное самопроизвольное необратимое изменение свойств материалов.

**Терагерцовое излучение**

Вид электромагнитного излучения, спектр частот которого расположен между инфракрасным и сверхвысокочастотным диапазонами.

**УФ**

Ультрафиолетовый.

**Эрзац**

Неполноценный заменитель чего-либо.

## ВВЕДЕНИЕ

Разработка и производство новой высокотехнологичной продукции в высококонкурентных рынках сегодня предполагает применение новых передовых материалов, к которым относят композитные материалы, умные материалы и металлопорошки для аддитивного производства.

Применение таких материалов позволяет создавать продукцию с принципиально новыми потребительскими характеристиками, что является одним из основных признаков отнесения материала к данной категории. Значительная часть новых материалов разрабатывается для определенных эксплуатационных условий, в которых применение традиционных материалов невозможно. Примерами таких материалов являются композитные материалы, способные выдерживать экстремальные температуры (более 250 °С), возникающие при сверхзвуковых скоростях и применяющиеся в самолетостроении.

Применение новых материалов повышает конкурентоспособность целых секторов: высокопрочные легкие металлические сплавы для аэрокосмической промышленности, антикоррозийные мембраны для современных систем фильтрации, сверхвысокотемпературные конструкции для более эффективных

турбин в производстве электроэнергии и другие. Рынок новых материалов охватывает полный жизненный цикл от добычи, первичной переработки, разработки способов формирования уникальных свойств и характеристик материалов до производства, тестирования и использования конечных изделий, а также утилизации и переработки отходов.

Основными драйверами рынка остаются высокотехнологичные отрасли промышленности, обеспечивающие спрос на новые материалы, такие как автомобилестроение, авиакосмическая отрасль, медицинские изделия, радиоэлектроника и приборостроение. Спрос в таких отраслях определяется как конкуренцией на существующих рынках, необходимостью соответствовать ужесточающимся экологическим требованиям, так и созданием заделов для конкуренции на рынках будущего, разработкой образцов новой перспективной техники.

Развитие цифровых технологий моделирования, машинного обучения делают процессы разработки новых материалов все более точными и эффективными. В первую очередь это технологии, позволяющие создавать материалы с заданными свойствами и моде-

лировать поведение конструкций из новых материалов на протяжении всего жизненного цикла. Многие инициативы направлены на внедрение подходов, основанных на данных и предполагающих применение статистики, машинного обучения и искусственного интеллекта для моделирования и оценки поведения материалов. Результатом является сокращение сроков, затрачиваемых на разработку материалов и описание их свойств. Ранее срок вывода на рынок для новых материалов составлял до 15 лет, а цифровые технологии сократили его до 5 лет. Развитие рынка аддитивных технологий будет оставаться одним из значимых факторов развития рынка новых материалов.[1]

<sup>1</sup> англ. advanced materials.

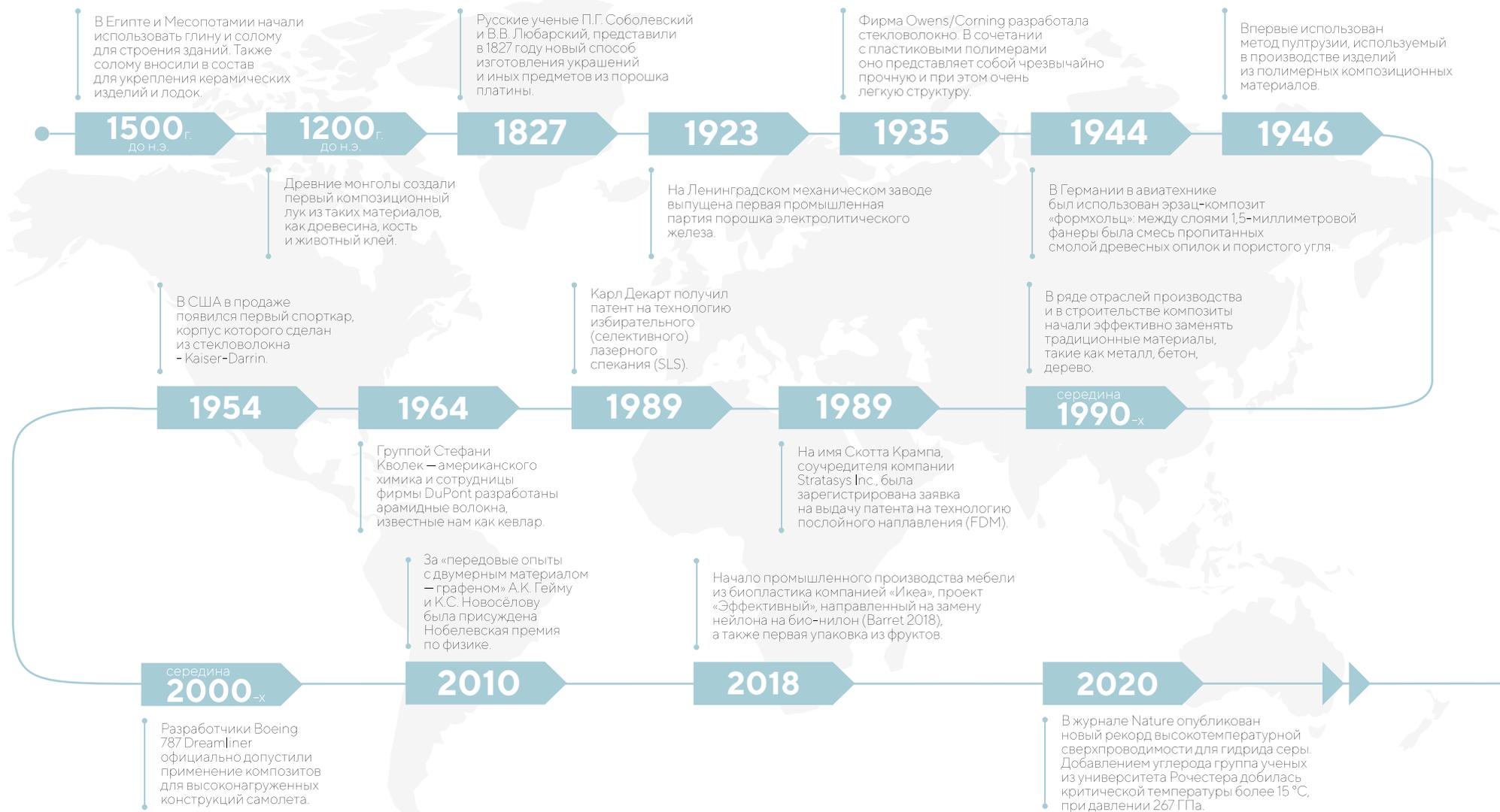
<sup>2</sup> Рост применения композиционных материалов в самолетостроении в виду их особых потребительских характеристик.

<sup>3</sup> Энергоэффективность, которая достигается за счет снижения веса конструкции при использовании новых материалов, обеспечивает снижение выбросов CO<sub>2</sub> в атмосферу.

<sup>4</sup> Рынок беспилотного транспорта.



## ИСТОРИЯ





## ОБЗОР ТЕХНОЛОГИИ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ



Рисунок 1 – Композиционные материалы

Композитные материалы (КМ) — это искусственно созданные материалы, состоящие из двух или более неоднородных и нерастворимых друг в друге компонентов, соединяемых между собой физико-химическими связями.

Одним из компонентов композиционных материалов является арматура, или упрочнитель, обеспечивающая необходимые механические характеристики материала, а другим компонентом — матрица или связующее, обеспечивающая совместную работу армирующих элементов. В качестве матрицы используют полимерные, металлические, керамические и углеродные материалы, в зависимости от типа которых композиционные материалы получают общее название.

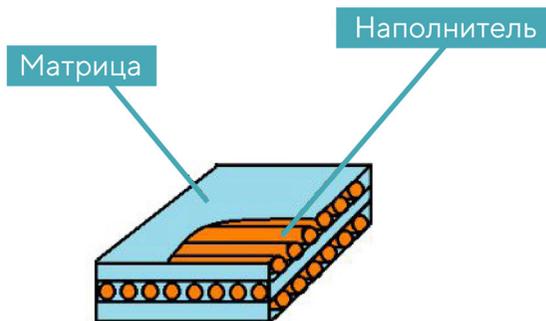


Рисунок 2 – Компоненты композиционного материала

Упрочнителями служат стеклянные, борные, углеродные, органические, нитевидные кристаллы карбидов, боридов, нитридов и другие и металлические проволоки, обладающие высокой прочностью и жесткостью. При формировании композитного материала используются индивидуальные свойства составляющих композицию элементов.

Свойства композитных материалов зависят от состава компонентов, количественного соотношения и прочности связи между ними. Комбинируя объемное содержание компонентов, можно в зависимости от назначения получить материалы с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости или получать композиции с необходимыми специальными свойствами, например, магнитными и другими.

#### Полимерные композиционные материалы

Большую группу композитных материалов составляют

полимерные композиты (ПКМ) — композитные материалы, в которых полимерный материал служит матрицей. Их использование имеет значительный экономический эффект.

Получение деталей из полимерных композитных материалов может осуществляться как процессами, характерными для формованных изделий из полимеров (литье под давлением, прессование и так далее), так и специальными процессами (намотка и так далее), уникальными для этого класса материалов.

#### Технологический процесс прессования полимерных композиционных материалов

Прессование полимерных композитных материалов (ПКМ) заключается в пластической деформации материала при одновременном воздействии на него тепла и давления с последующей фиксацией формы изделия. Прессование композитов проводится в пресс-формах, конфигурация полости которых соответствует конфигурации будущего изделия.

Пресс-формы устанавливаются на прессах, назначение которых — создание необходимого давления прессования. Помещенный в пресс-форму холодный или предварительно подогретый материал разогревается до температуры прессования и, подвергаясь под давлением прессования деформации одномерного течения, заполняет полость формы и одновременно уплотняется.

Фиксация формы изделия происходит в результате отверждения реактопластов или охлаждения термо-

пластов, либо охлаждения под давлением до температуры ниже температуры стеклования полимеров (для термопластов).[29]



Рисунок 3 – Прессование полимерных композиционных материалов

### Технологический процесс литья под давлением

В процессе литья под давлением формуемый полимерный композитный материал поступает в инжекционный (пластикационный) цилиндр литьевой машины, где нагревается до температуры 300-350 °С в случае термопластичной матрицы и до температуры 80-110 °С – в случае термореактивной матрицы. Пластифицированный материал при поступательном движении шнека или поршня впрыскивается через мундштук (форсунку) с соплом в литниковый и разводящий каналы, а оттуда в гнезда пресс-формы, где ПКМ с термопластичной матрицей охлаждается до температуры 20-110 °С, а с термореактивной – нагревается до температуры 160-200 °С. В пресс-форме материал выдерживается под давлением для уплотнения, затем

пресс-форма размыкается и сформованное изделие выталкивается из нее.

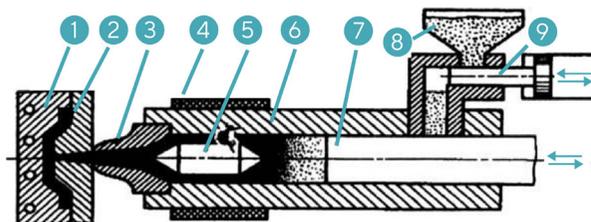


Рисунок 4 – Установка литья под давлением

1- пресс-форма; 2- деталь; 3- сопло; 4- электронагреватель; 5- рассекатель; 6- рабочий цилиндр; 7- поршень; 8- загрузочный бункер; 9- дозатор.

### Технологический процесс экструзии

В процессе экструзии полимерных композитных материалов формуемый материал поступает в зону питания экструзионного оборудования, где увлекается вращающимся червяком диаметром 20-250 мм и продвигается вдоль обогреваемого цилиндрического корпуса в зоны пластикации и дозирования. По мере продвижения материала в сторону головки полимерная матрица плавится за счет трения и внешнего нагрева, а расплав ПКМ гомогенизируется. Расплавленный полимерный композитный материал нагнетается в головку, откуда выходит сформованное изделие, которое затем охлаждается.

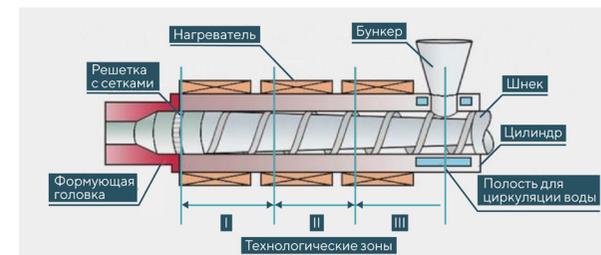


Рисунок 5 – Экструзионная установка

### Технологический процесс пултрузии

Во время процесса пултрузии происходит протягивание композиции матричного полимера с непрерывными волокнами через формообразующее и консолидирующее устройство – пултрузионную головку.

В отличие от экструзии, где основным рабочим воздействием служит давление, в процессе пултрузии таковым является тянущее усилие.

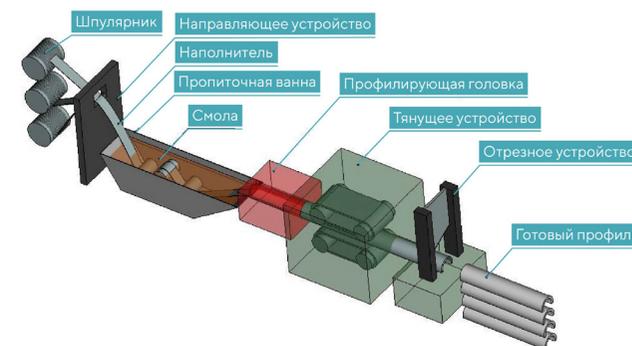


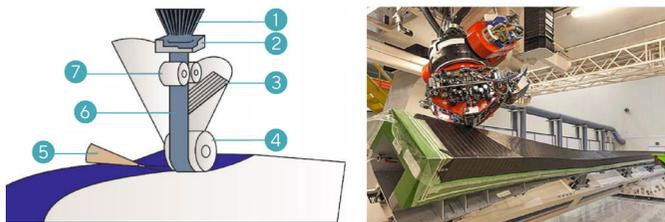
Рисунок 6 – Процесс пултрузии

**Технологический процесс контактного формования**

Контактное формование или выкладка полимерных композитов заключается в следующих последовательных технологических операциях:

- Слои препрега или волокнистого наполнителя по-слою выкладываются или наматываются на форму с одновременной пропиткой его связующим, чаще всего холодного отверждения, и уплотнением прикаточным роликом или кистью, которой наносится связующее.
- Затем они отверждаются без давления или опрессовываются контрматрицей под давлением 0,01-0,2 Мпа.
- Снятые с формы изделия подвергаются механической обработке.

Формование композитов контактным методом обеспечивает чистоту и точные размеры изделия, которое непосредственно контактирует с формой в процессе прессования. [29]



1 – волокна ПКМ; 2 – формователь ленты; 3 – нож; 4 – ролик прижимной; 5 – головка нагревательная; 6 – лента препрега; 7 – ролики подачи ленты

Рисунок 7 – Процесс контактного формования



Рисунок 8 – Выкладка композитного материала

**Технологический процесс намотки**

Технологический процесс намотки происходит следующим образом. Термопластичный матричный полимер сначала совмещают с волокнистым наполнителем по порошковой, волоконной или расплавной технологии, получают однонаправленную ленту, которую затем наматывают на оправку, нагревая до температуры плавления матричного полимера и соединяя с ранее нанесенными слоями. Нагрев и консолидацию лент осуществляют непосредственно в ходе укладки.

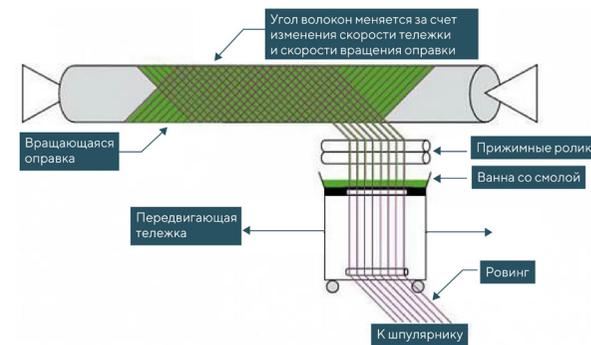


Рисунок 9 – Намотка композитного материала



Рисунок 10 – Намотка композитных лопастей вертолета на станке с ЧПУ

### Технологический процесс инъекции

При методе инъекции (RTM) полиэфирной смолы в закрытую форму используется оснастка из матрицы и ответной формы — пуансона. Стекломатериал укладывается между матрицей и ответной формой, затем в форму под давлением вливается отвердитель – полиэфирная смола.[30]

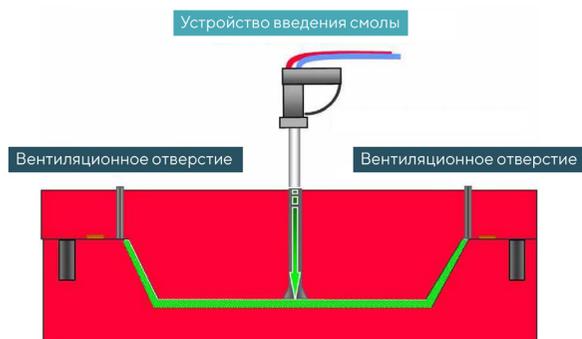


Рисунок 11 – Процесс инъекции (RTM-процесс)

### Технологический процесс изготовления углепластика

При получении углепластика углеродные волокна пропитываются фенолоформальдегидной смолой, затем подвергаются воздействию высоких температур (+2000 °С), при этом органические вещества подвергаются пиролизу и образуется углерод. Чтобы материал был менее пористым и более плотным, операцию повторяют несколько раз.

Другой способ получить углеродный материал - прокалить обычный графит при высоких температурах в атмосфере метана. Мелкодисперсный углерод, обра-

зующийся при пиролизе метана, закрывает все поры в структуре графита. Плотность такого материала увеличивается по сравнению с плотностью графита в полтора раза.

### Технологический процесс изготовления композитов с металлической матрицей

Одним из способов получения композитов с металлической матрицей служит пропитка волокон расплавом металла, которая осуществляется главным образом либо в защитной атмосфере, либо в вакууме.

Для этого используются промышленные вакуумные печи, оснащенные устройствами для заливки форм в вакууме.[33]

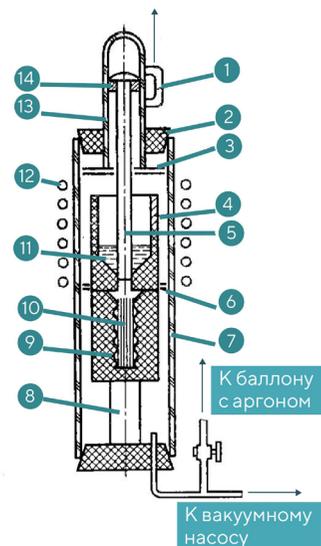


Рисунок 12 – Установка, применяемая для производства композитов

1- магнит; 2- резиновая пробка; 3- тепловой экран; 4- графитовый тигель; 5- графитовый шток; 6- тепловой экран; 7- кварцевая труба; 8- керамическая опора; 9- графитовая форма; 10- волокна; 11- расплав матрицы; 12- индуктор; 13- кварцевый колпак; 14- стальное кольцо.

### Стеклопластики

Стеклопластики – это полимерный композитный материал, армированный стекловолокном, которое образуется из расплавленного неорганического стекла. В качестве матрицы часто используются термореактивные синтетические смолы, такие как полиэфир, фенол, эпоксидная смола и другие, а также термопластичные полимеры – полиамиды, полиэтилен, полистирол и тому подобное.

Стеклопластики материалы обладают высокой прочностью, низкой теплопроводностью, высокими электроизоляционными свойствами и прозрачностью для радиоволн.

Стеклопластик – недорогой полимерный композит. Его использование оправдано в серийном и массовом производстве, в судостроении, в радиоэлектронике, в строительстве, при изготовлении оконных рам для стеклопакетов, в автомобильной и железнодорожной технике.



Рисунок 13 – Ёмкости из стеклопластика

### Углепластики

Углепластики — это композитные материалы, которые состоят из полимерной матрицы и армирующих элементов в виде углеродных волокон. Углеродные волокна получают из синтетических и натуральных волокон на основе сополимеров акрилонитрила, целлюлозы и других.

Для изготовления композитов на основе углеродного волокна используются такие же матрицы, что и для стеклопластиков — терморезистивные и термопластичные полимеры.

Основными преимуществами углепластика перед композитами на основе стекловолокна являются его низкая плотность и более высокий модуль упругости. Углепластик — очень легкий и прочный материал. Углеродные волокна и, соответственно, углепластики практически не имеют линейного расширения.

Углепластики используются в авиации, космической

промышленности, машиностроении, медицине, спортивном оборудовании. Из углепластиков производят высокотемпературные узлы для ракет и скоростных самолетов, тормозные колодки и диски для авиационной техники и многоразовых космических аппаратов, электротермическое оборудование.



Рисунок 14 — Деталь мотоцикла из углепластика

### Боропластики

Боропластики представляют собой композиции, состоящие из полимерной матрицы и борных волокон. Для получения боропластика используются модифицированные эпоксидные и полиамидные связующие. Волокна могут представлять собой либо мононити, либо жгуты, оплетенные вспомогательной стеклянной нитью, или лент, в которых борные нити переплетаются с другими нитями.

Благодаря высокой твердости волокон материал обладает высокими механическими свойствами, а также бор служит для поглощения тепловых нейтронов. Волокно из бора имеет высокую прочность на сжатие,

сдвиг, твердость, тепловую и электрическую проводимость. Однако высокая хрупкость материала затрудняет их обработку и накладывает ограничения на форму изделий из боропластика.

Композиты на основе борных волокон используются в основном в авиационной и космической технике для изготовления деталей, которые подвергаются длительным нагрузкам. Стоимость борных волокон очень высока из-за особенностей технологии их производства. [3]



Рисунок 15 — Деталь из боропластика

### Органопластики

Органопластики представляют собой композиты из полимерных связующих и наполнителей, которые представляют собой органические синтетические, реже натуральные и искусственные волокна в виде жгутов, нити, тканей, бумаги и других.

В терморезистивных органопластике матрица обычно состоит из эпоксидных, полиэфирных и фенольных смол, а также полиимидов. Материал содержит 40–

70% наполнителя. Содержание наполнителя в органо-пластиках на основе термопластичных полимеров – полиэтилена, ПВХ, полиуретана и других – составляет от 2 до 70%. Степень ориентации макромолекул наполнителя играет важную роль в улучшении механических свойств органопластиков. Макромолекулы жесткоцепного полимера (кевлара) в основном ориентированы по оси полотна и поэтому имеют высокую прочность на разрыв вдоль волокон. Бронежилеты производят из армированных кевларом материалов. Органопластики имеют низкую плотность, они легче, чем композиты, армированные стекловолокном и углеродным волокном, относительно высокую прочность на разрыв, ударную вязкость, но низкую прочность на сжатие и изгиб. Органопластики широко используются в автомобильной, авиационной и космической технике, радиоэлектронике, судостроении, химическом машиностроении, производстве спортивного инвентаря и других.

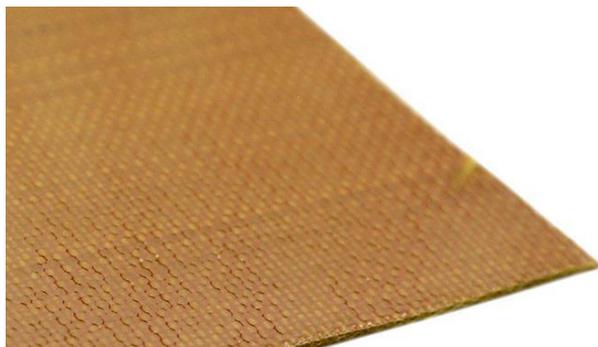


Рисунок 16 – Лист из органопластика

### Порошковые полимеры

Порошковые полимеры используются как для удешевления материала, так и для придания ему особых свойств. Используются различные наполнители из терморезистивных и термопластичных полимеров:

1. Карбонат кальция и каолин (белая глина) дешевы, их запасы практически неограниченны, белый цвет дает возможность окрашивать материал. Их используют для производства жестких и эластичных материалов из ПВХ, для производства труб, электроизоляции, облицовочной плитки и др., полиэфирного стеклопластика, наполнителя из полиэтилена и полипропилена.
2. Добавление талька в полипропилен значительно увеличивает модуль упругости и термостойкость этого полимера.
3. Сажа в основном используется в качестве наполнителя для каучуков, но он также входит в состав полиэтилена, полипропилена, полистирола и так далее.
4. Широко используются органические наполнители – древесная мука, ореховая скорлупа, растительные и синтетические волокна.
5. Крахмал используется в качестве наполнителя при производстве биоразлагаемых композиционных материалов.

### Текстолиды

Текстолиды представляют собой слоистые пластики, армированные тканями из различных волокон. Связующие в текстолидах представляют собой широкий спектр терморезистивных и термопластичных полимеров, также используются неорганические связующие

на основе силикатов и фосфатов, что влияет на свойства и области применения текстолидов. В качестве наполнителей применяются самые разные волокна:

- хлопковые;
- синтетические;
- стеклянные;
- углеродные;
- асбестовые;
- базальтовые и другие.



Рисунок 17 – Деталь из порошкового полимера

### Композитные материалы с металлической матрицей

При создании композитных материалов с металлической матрицей (МКМ) применяют алюминий, магний, никель, медь и другие металлы. Наполнителем служат высокопрочные волокна и тугоплавкие частицы разной дисперсности, не растворяющиеся в основном металле.

Свойства дисперсно-упрочненных металлических композитов изотропны, то есть одинаковы во всех направлениях. Добавление 5–10% армирующих наполнителей — тугоплавких оксидов, нитридов, боридов, карбидов — приводит к повышению сопротивляемости матрицы нагрузкам, увеличению жаропрочности композита по сравнению с исходной матрицей.

**Технологические процесс изготовления дисперсно-упрочнённых композитов с металлической матрицей**

Дисперсно-упрочненные композиционные материалы с металлической матрицей получают, вводя порошок наполнителя в расплавленный металл, или методами порошковой металлургии.

Этапы получения композиционных материалов с металлической матрицей следующие:

- Очистка поверхности волокон и матрицы.
- Объединение волокон матрицы.
- Получение МКМ методами пластической деформации, порошковой металлургии, литья или комбинированными методами.

**Металлы, армированные волокнами**

Армирование металлов волокнами, нитевидными кристаллами, проволокой значительно повышает как прочность, так и жаростойкость металла. Например, сплавы алюминия, армированные волокнами бора, можно эксплуатировать при температурах до +450–500 °С вместо +250–300 °С.

Применяют оксидные, боридные, карбидные, нитридные металлические наполнители, углеродные волок-

на. Керамические и оксидные волокна из-за своей хрупкости не допускают пластическую деформацию материала, что создает значительные технологические трудности при изготовлении изделий, тогда как использование более пластичных металлических наполнителей позволяет переформование.

Получают такие композиты пропитыванием пучков волокон расплавами металлов, электроосаждением, смешиванием металла с порошком и последующим спеканием и так далее. Металлы, армированные волокнами, применяются в ракетной и авиационной технике и других отраслях. [4]

**Твёрдые сплавы**

Твердые сплавы — это гетерогенные материалы, в которых частицы высокотвердых тугоплавких соединений<sup>5</sup> сцементированы пластичным металлом-связкой — кобальтом, никелем, железом и их сплавами. Твердые сплавы обладают высокой твердостью и износостойкостью и сохраняют эти свойства при температуре 900 – 1500 °С.

В промышленности используются очень твердые материалы на основе кубического нитрида бора – боразон, эльбор. На его основе изготовлен гексанитовый сплав. Твердость этого сплава превышает твердость алмаза, а температура, которую он выдерживает, достигает +1930 °С. При работе резцом из гексанита производительность труда увеличивается в десять раз.



Рисунок 18 — Композит с металлической матрицей

**Керамические композитные материалы**

Керамические композиционные материалы (ККМ) — это материалы, в которых матрица изготовлена из керамики, а арматура — из металлических или неметаллических наполнителей.

Армирование керамических материалов волокнами и дисперсными металлическими и керамическими частицами приводит к получению высокопрочных композитов.

Диапазон волокон, пригодных для армирования, ограничен свойствами исходного материала. Часто используются металлические волокна. Прочность на разрыв увеличивается не сильно, однако повышает-

<sup>5</sup> Карбиды, реже нитриды или бориды переходных металлов. Наиболее широко используют карбиды вольфрама, титана, тантала, хрома или их сочетаний.

ся термостойкость — материал меньше ломается при нагревании, но бывают случаи, когда прочность материала снижается. Это зависит от соотношения коэффициентов теплового расширения матрицы и армирующего компонента.

ККМ с металлическими волокнами изготавливаются методом горячего прессования. Используются вольфрамовые, молибденовые, ниобиевые и стальные волокна. Во время армирования образуется пластическая сетка, которая может создать целостность керамики после растрескивания и снизить риск преждевременного разрушения. Однако данный вид материалов имеет слабую стойкость к высокотемпературному окислению.

Армирование керамики дисперсными металлическими частицами приводит к появлению новых материалов, керметов с большей стойкостью к термоударам и теплопроводностью. Их получают обработкой смеси керамических порошков методами порошковой металлургии.

Порошки на основе никеля, железа, кобальта и хрома используются в качестве металлической связки в керметах. Для работы при температуре + 450–630 °С используются сплавы на основе оксида алюминия, при температурах не выше +1000 °С используются керметы на основе карбидов титана, а при более высоких температурах — на основе карбидов бора и кремния. Керметы на основе боридов переходных металлов обладают высокой термостойкостью и используются при изготовлении деталей ракетных двигателей.

Керамические композиты с углеродными волокнами перспективны для применения при высоких температурах.

Материалы «керамика — керамика» имеют большие перспективы из-за небольшой разницы в модулях упругости матрицы и наполнителя, коэффициентах расширения и способности работать до +2000 °С.

Помимо металлокерамических твердых сплавов используются минералокерамические материалы. Они состоят из зерен оксидов металлов или синтетических минералов, соединенных синтетическим стеклом. Наиболее часто используемым является микролит. Для его производства используется корунд (кристаллический оксид алюминия) с добавлением оксида магния.

Микролиты обладают высокой химической стойкостью, твердостью, красностойкостью, однако очень хрупкие. Хрупкость и низкая прочность ограничивают область их применения. Их эффективно используют для обработки изделий из цветных металлов с малой глубиной резания, для чистовой обработки заготовок из стали и чугуна.

Магнитные, пористые и контактные материалы, полученные методами порошковой металлургии, широко используются в промышленности. Из жаропрочного кермета изготавливаются детали газовых турбин, арматура для электропечей, детали ракетной и реактивной техники. Твердые износостойкие керметы используются для изготовления режущих инструментов и деталей.

Кроме того, керметы используются в специальных областях техники — это тепловыделяющие элементы ядерных реакторов на основе оксида урана, фрикционные материалы для тормозных устройств и так далее.

Перспективно использование стеклокерамических и углеродокерамических композиционных материалов для конструкционных и теплозащитных целей («Стеklarм», «Геларм», «Карбокс» и другие).

Области применения композитных материалов многочисленны. Помимо авиакосмической, ракетной и других специальных отраслей, они востребованы в строительстве энергетических турбин, автомобильной, горнодобывающей, металлургической промышленности, строительстве и т. д. Спектр применения этих материалов постоянно расширяется. [5]

#### **Технологический процесс изготовления керамических композитов**

Керамические композиты получают горячим прессованием, таблетированием с последующим спеканием под давлением или шликерным литьем волокна заливаются суспензией из матричного материала, которая также спекается после сушки. Керамические материалы имеют высокую температуру плавления, как правило, высокую стойкость к окислению.



Рисунок 19 – Керамические композиты

### УМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Умные материалы представляют собой новое поколение материалов, которые способны реагировать на атмосферное давление, температуру, изменений в химическом составе и другие параметры.

#### К группе умных материалов относят адаптивные материалы:

1. Пассивные, в которые вводят детекторы (в виде волокон, пленок и других элементов), изменяющие свои характеристики при внешних воздействиях.
2. Реактивные – сами реагируют на внешние воздействия.
3. Интеллектуальные – не только реагируют на внешние воздействия, но и сами обеспечивают устранение их последствий, то есть самовосстанавливаются.

Пьезоэлектрические материалы составляют самую большую долю на рынке. Механические деформации или напряжения могут вызывать электрические дипо-

ли в этих материалах, которые генерируют электричество. Пьезоэлектричество может генерироваться различными источниками, включая природные кристаллы и синтетические кристаллы. Наблюдается растущий спрос на пьезоэлектрические устройства в различных отраслях, в том числе в аэрокосмической и оборонной, автомобильной, медицинской, информационной, коммуникационной и обрабатывающей промышленности.

Нитинол, сплавы на основе меди и различные полимеры с памятью формы широко используются в приводах, двигателях, датчиках и конструкционных изделиях. Всё чаще данные материалы находят применение в медицинских целях, включая хирургические устройства, протезы.

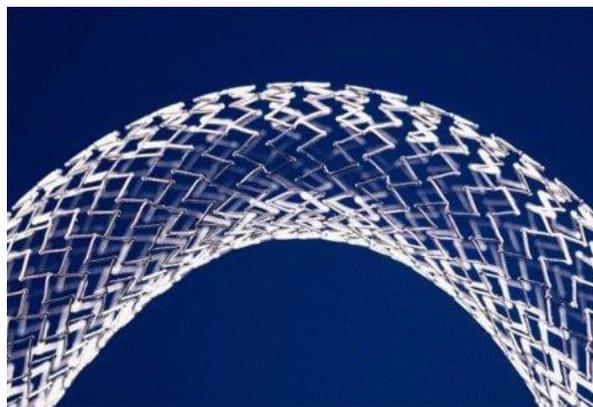


Рисунок 20 – Нитинол

#### Ниже приведены примеры технологий, обеспечиваемых применением умных материалов:

1. Материалы с повышенной тепловой и электрической проводимостью уже используются в коммерческих целях и приобретает все большую популярность. Существуют различные пути повышения проводимости, прежде всего за счет включения нанотрубок (графена и углеродных нанотрубок) или металлических добавок, покрытий, матов и проводов. Основными направлениями материалов с повышенной теплопроводностью являются системы антиобледенения, системы подогрева инструмента и рассеивания тепла. Электропроводность наиболее востребована транспортным сектором (защита от удара молнии, защита от электромагнитных помех, электростатические покрытия и др.). Также значительную долю рынка занимают аккумуляторы на основе лития, солнечные панели и электронные компоненты.
2. Материалы со встроенными датчиками могут обеспечивать мониторинг деталей в режиме реального времени как в процессе производства, так и в процессе эксплуатации. Мониторинг состояния конструкций является сложной задачей для композитных деталей с целью обнаружения расслоения, трещин или любых других признаков механической усталости. В этой области существует множество конкурентных технологий, включая ряд волоконно-оптических датчиков (FOS), пьезоэлектрические пластины и многое другое.
3. Материалы, способные хранить энергию, наиболее актуальны в контексте электрификации автомобиль-

ной промышленности. Компания IDTechEx считает, что внедрение таких материалов будет проходить в два этапа: первый этап — встраивание обычных литий-ионных аккумуляторов в композитные ламинарные структуры, цель второго этапа в том, чтобы сам материал действовал как аккумулятор.

4. Материалы с механизмами адаптивного реагирования являются одним из направлений, в котором активно проводятся тесты и эксперименты во многих высокотехнологичных отраслях:

- Материалы пассивной группы используют для диагностики конструкций из полимерных композитов, армированных волокнистыми наполнителями. Они работают на принципе самоконтроля состояния изделий с помощью встроенных в их структуру датчиков. Характерным признаком этих материалов является появление сигнала датчика о возникших в материале изменениях при внешних воздействиях. Наибольшее развитие получили волоконно-оптические датчики, которые идеально подходят к структуре и технологии получения полимерных волокнистых композитов.

- Реактивные материалы и конструкции имеют различные типы реагирования на изменения окружающей среды. К самым простым системам можно отнести конструкции рабочих органов машин для земляных работ, которые изменяют свою структуру или форму при механических воздействиях. К ним относятся самозатачивающиеся зубья, ножи и режущие кромки элементов рабочего оборудования. Они имеют двухслойную структуру из разнородных материалов, отличающихся

различной износостойкостью. При контакте с грунтом материал нижнего слоя изнашивается быстрее материала верхнего слоя, что обеспечивает постоянную острую кромку режущего элемента при эксплуатации. К этой же категории можно отнести отвалы и ковши с изменяемой формой. В зависимости от категории трудности разработки грунта они могут изменять свою форму благодаря демпферам (механическим или гидравлическим), обеспечивая оптимальную энергоёмкость процесса резания или копания грунта. [34]

- К группе интеллектуальных материалов относятся системы, которые обладают способностью не только производить самодиагностику, но и осуществлять самовосстановление. Примером могут служить самовосстанавливающиеся полимеры, в объеме которых равномерно распределены микроконтейнеры (микрочапулы или полые микроволокна) с восстанавливающим веществом. [1]. В группу интеллектуальных материалов включают такие материалы, как аэрогель, материалы с памятью формы, высокотемпературные сверхпроводники, стекло с редкоземельными металлами, ДНК-листы, метаматериалы, гидрофобные поверхности, биоразлагаемые материалы, перовскит.

#### **Аэрогель**

Аэрогелями называют класс материалов, имеющих структуру с открытой пористостью микро- и нанодиапазона и большими площадями поверхности (900 м<sup>2</sup>/г или более). Пористость аэрогеля превышает 90%. [36]

#### **Характерные свойства аэрогеля:**

- низкая плотность;
- низкая теплопроводность (до 0,016 Вт/(м·К)), в 10 раз ниже, чем у дерева;
- низкая скорость распространения звука (до 70 м/с);
- низкий коэффициент преломления света (до 1,0002);
- электрическая проводимость может меняться в широких пределах в зависимости от используемого материала.
- отношение площади полной поверхности к весу: до 3200 м<sup>2</sup>/г. (это означает, что если представить площадь всей поверхности в виде единой плоскости, то одного грамма этого материала хватит, чтобы покрыть половину футбольного поля).

В основе уникальных свойств аэрогелей лежит их пространственная структура с открытыми порами. От материала стенок зависят механические свойства, а также электропроводность конкретного аэрогеля. [37]

Структуру аэрогеля образуют сферические кластеры из кварца диаметром примерно 0,004 мкм, формирующие трехмерную сетку, поры которой заполнены воздухом. Размеры пор в десять и более раз превышают размеры кластеров, что и позволяет получать очень легкий материал. По структуре аэрогели представляют собой древовидную сеть из объединенных в кластеры наночастиц размером 2–5 нм и пор размером до 100 нм. [38]

**Процесс получения аэрогелей:**

- формирование геля в среде соответствующего растворителя посредством золь-гель процесса;
- сушка в специальных условиях.

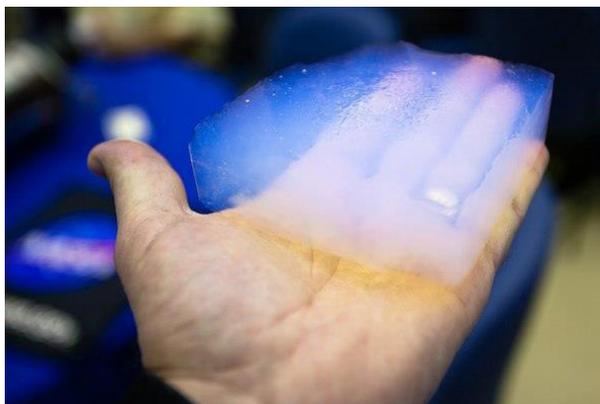


Рисунок 21 – Аэрогель из диоксида кремния

**Материалы с памятью формы**

Эффект памяти формы (ЭПФ) – явление возврата к первоначальной форме при нагреве, которое наблюдается у некоторых материалов после предварительной деформации.

Также обнаружено множество сплавов, обладающих в разной степени свойствами «памяти формы»: Ni-Al, Ni-Co, Ni-Ti; Ti-Nb; Fe-Ni; Cu-Al, Cu-Al-Ni и др.

**Механизм реализации эффекта памяти формы:**

1. В исходном состоянии в материале существует определенная структура (на рисунке обозначена правильными квадратами).
2. При деформации внешние слои материала вытяги-

ваются, а внутренние сжимаются. В материалах с памятью формы мартенсит является термоупругим.

3. При нагреве начинает проявляться термоупругость мартенситных пластин, т.е. 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. [40]

Эффект памяти формы зависит от марки сплава со строго выдержанным химическим составом. От этого зависит температура мартенситных превращений. Эффект памяти формы проявляется только при термоупругих мартенситных превращениях. Эффект памяти формы может проявляться несколько миллионов циклов.

Мартенситное превращение (МП) полиморфное превращение, при котором изменение взаимного расположения составляющих кристалл атомов происходит путём их упорядоченного перемещения, причем относительные смещения соседних атомов малы по сравнению с межатомным расстоянием.

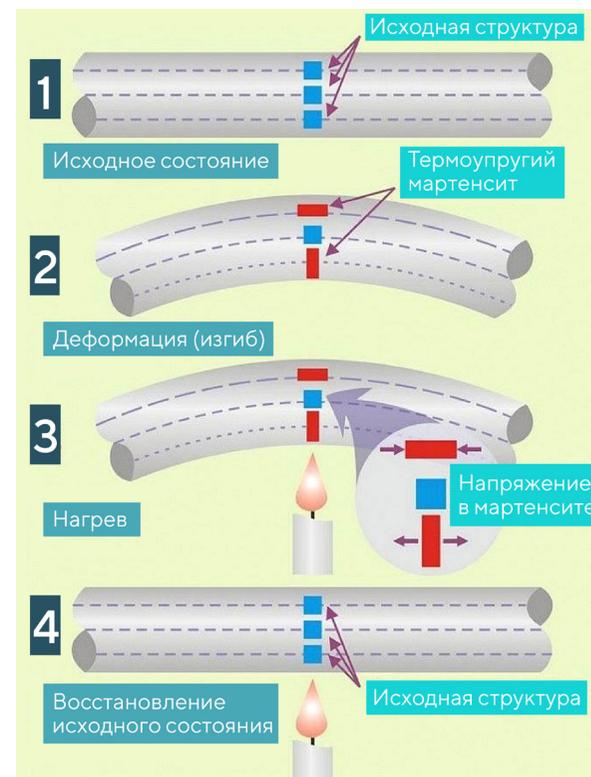


Рисунок 22 – Эффект памяти формы

**Высокотемпературные сверхпроводники**

Высокотемпературные сверхпроводники – это все известные в настоящее время оксиды, большинство из которых содержат медь, но имеются также и соединения без меди. Особое значение в оксидных высокотемпературных сверхпроводниках имеет состояние кислородной подрешетки, т.е. концентрация, струк-

турное положение и подвижности атомов кислорода в кристаллической структуре. Это вызвано тем, что с кислородом в оксидных сверхпроводниках связывают как понимание природы высокотемпературной сверхпроводимости, так и объяснение нестабильности свойств высокотемпературных сверхпроводящих материалов.[51]

Высокотемпературными сверхпроводниками считают сверхпроводники, имеющие критические температуры выше 30К (-243 °С). Иногда граничной температурой между сверхпроводниками и высокотемпературными сверхпроводниками считают температуру кипения азота – это 77 К (-196 °С).

На сегодняшний день самой высокой критической температурой считают температуру, равную 260 К (-13 °С). При такой температуре выявили сверхпроводящие свойства у сжатого супергидрида лантана.

Явление сверхпроводимости заключается в полной утрате материалом электрического сопротивления при охлаждении ниже характерной для данного материала критической температуры. Особое значение высокотемпературной сверхпроводимости заключается в возможности практического использования без сильного охлаждения или с более дешевыми и удобными охладителями (жидким водородом, азотом, метаном). [50]

Сущность высокотемпературной сверхпроводимости заключается в том, что система электронов в таких соединениях является латтинжеровской жидкостью в нормальном состоянии и состоянии сверхпроводимости.

[49]

В настоящее время развиваются две технологии производства высокотемпературных сверхпроводников:

- ВТСП-проводники первого поколения – композиционные ленточные проводники (или листы) в серебряной оболочке на основе керамики соединения  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  – Bi-2223/Ag/
- ВТСП-проводники второго поколения – металлические ленты с нанесенным на них слоем ВТСП-соединения  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ -Y-123 (или R-123, где R-редкоземельный элемент). [52]

#### **Стекло с редкоземельными металлами**

Редкоземельные элементы проявляют между собой большое сходство химических и некоторых физических свойств, что объясняется почти одинаковым строением наружных электронных уровней их атомов. Все они металлы серебристо-белого цвета, при том все имеют сходные химические свойства (наиболее характерна степень окисления +3).

#### **Название «редкоземельные» было дано в связи**

##### **с тем, что такие металлы:**

- редко встречаются в земной коре (содержание (1,6-1,7) 10–2% по массе);
- образуют тугоплавкие, практически не растворимые в воде оксиды (такие оксиды в начале XIX века и ранее назывались «землями»).

Монокристаллические соединения редкоземельных элементов, а также стёкла применяют для создания лазерных и других оптически активных и нелинейных элементов в оптоэлектронике. На основе Nd, Y, Sm, Er,

Eu с Fe-B получают сплавы с рекордными магнитными свойствами (высокие намагничивающая и коэрцитивная силы) для создания постоянных магнитов огромной мощности, по сравнению с простыми ферросплавами.

#### **ДНК – коробочки**

Технологии сборки двух- и трехмерных конструкций из нуклеиновых кислот получили название ДНК-оригами.

Комплементарные взаимодействия между нуклеотидами, составляющими нить ДНК, позволили ученым сконструировать такую цепочку, которая самопроизвольно собирается в структуру наноразмерной коробки с откидывающейся крышкой.

Такие коробочки можно наполнить лекарственными препаратами и использовать для точной доставки. Также ДНК-коробки исследуют на возможность применения в качестве логических элементов вычислительной цепи.

ДНК представляет собой идеальный материал для конструирования микроскопических объектов с заранее определенной последовательностью элементов, определяющих свойства молекулы. В результате отдельные нити могут самопроизвольно собираться в «гармошки» квадратной формы на основе комплементарного взаимодействия нуклеотидов.

«Крышки» этих коробочек при нормальных условиях остаются закрытыми, однако при добавлении в среду определенных небольших фрагментов ДНК составлявшие крышки нуклеотиды связываются с ними, и

открывают крышки. Это происходит следующим образом: к крышке и прилегающей стенке были прикреплены молекулы красителей, которые флуоресцировали красным, когда находились в непосредственной близости друг от друга, и зеленым, когда расходились подальше. [56]

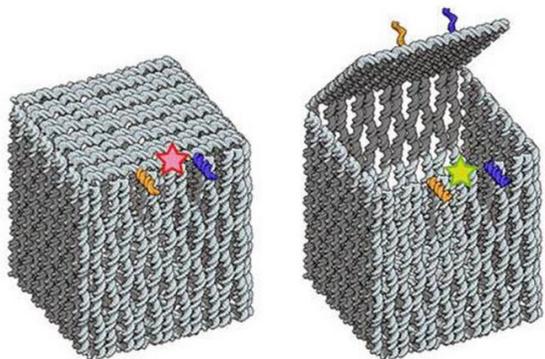


Рисунок 23 – ДНК-коробки

### Метаматериалы

Метаматериалы выделены в отдельный класс материалов, так как их свойства зависят от структуры компонентов, упорядоченных особым образом, и могут кардинально отличаться от свойств составляющих их компонентов. К метаматериалам такого типа относятся, например, синтетические дихроичные материалы, состоящие из изотропных компонентов: именно асимметричная структура композитного материала, приводит к появлению анизотропии формы. Существуют метаматериалы с многократно увеличенными электрической проницаемостью и магнитной воспри-

имчивостью, метаматериалы, эффективность нелинейных эффектов в которых увеличивается на много порядков по сравнению с обычными веществами. Например, эффективность гигантского комбинационного рассеяния может возрасти в  $10^6$  раз по сравнению с вынужденным комбинационным рассеянием в компонентах, на порядки увеличивается эффективность генерации второй и третьей гармоник.

Хотя возможность управления структурой компонентов материала дает новую степень свободы в конструировании их свойств, однако настоящую революцию произвели работы, продемонстрировавшие возможность создания метаматериалов со свойствами, которые не встречаются в природных материалах. Один из наиболее известных классов метаматериалов – метаматериалы с отрицательным коэффициентом преломления, у которых одновременно отрицательны диэлектрическая и магнитная проницаемость. Существование веществ с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостью было теоретически обосновано в работе В.Г. Веселаго, вышедшей в 1967 г. Как показал В.Г. Веселаго, такие вещества характеризуются отрицательными значениями показателя преломления, а многие оптические свойства существенно отличаются от свойств традиционных материалов. Природных материалов с такими свойствами пока не обнаружено. Экспериментально вещества с отрицательным показателем преломления в радиодиапазоне электромагнитных волн были созданы в 1999 г.

В настоящее время ведутся работы по созданию и исследованию метаматериалов с отрицательным показателем преломления в оптическом диапазоне. Все созданные искусственно материалы с одновременно отрицательными диэлектрической и магнитной проницаемостями в оптическом диапазоне являются композитами, содержащими металлические и диэлектрические компоненты.

Весьма перспективным классом метаматериалов являются фотонные кристаллы, в частности резонансные фотонные кристаллы. [48]

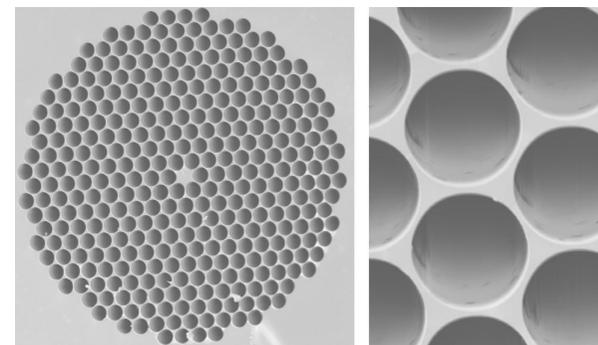


Рисунок 24 – Фотонно-кристаллический волновод

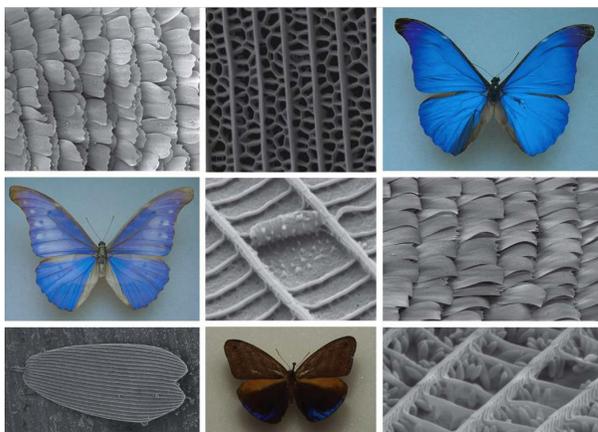


Рисунок 25 – Фотонный кристалл чешуек крыла бабочки

### Гидрофобные покрытия

Цветок лотоса обладает необычными физико-химическими свойствами. Благодаря особому строению и очень высокой гидрофобности его листьев и лепестков цветы лотоса остаются чистыми.

Эффект лотоса был открыт в семидесятых годах 20 века немецким ботаником, профессором Вильгельмом Бартлоттом. При помощи электронной микроскопии было обнаружено, что поверхность листа имеет особый рельеф в виде «шипов», образованных гидрофобными веществами. Капля воды на такой поверхности имеет малую площадь соприкосновения, не может удерживаться на ней и скатывается, унося с собой пыль, сажу, споры грибов и другие загрязнения поверхности, что и приводит к эффекту самоочистки.

Под эффектом лотоса в настоящее время в науке понимают эффект практически полной несмачиваемости поверхности твердого тела жидкостью, возникающий из-за особенностей рельефа данной поверхности на микро- и наноуровне, приводящих к снижению площади контакта жидкости с поверхностью данного тела. Есть множество примеров, демонстрирующих широкое применение технологий на основе «эффекта лотоса», но большинство из них относятся к созданию специальных покрытий для автомобилей – для корпуса, окон, пропитки тентов и пр. Нанотехнологии на основе этого явления помогли увеличить срок эксплуатации автомобильных покрытий, защитить внешний вид автомобиля от постоянных угроз внешней среды. [47]



Рисунок 26 – Капля на поверхности лотоса

### Биоразлагаемые материалы

Материалы, которые под действием солнечного света или микроорганизмов быстро разлагаются на безвредные компоненты. [43]

В настоящее время создан пластик, основанный на биополимере. В отличие от синтетических пластмасс, он создан из компонентов, существующих в природе. Это значит, есть бактерии, которые им питаются и разлагают его. Одним из таких полимеров является крахмал. Он находится в растениях и является питательной средой для микроорганизмов.

### Выделяют три вида биопластиков:

1. Биопластик, изготовленный из термопластической смолы на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом (АБС-полимер). Это биологические полимеры растительного происхождения. Комбинирование разных смол позволяет менять свойства пластика. АБС-пластик считается одним из самых прочных. Из него изготавливают корпуса мебели, детали автомобиля. При изоляции от внешней среды период службы увеличивается в разы.
2. Полигидроксиалканат – полимер, синтезированный бактериями. В отсутствие азота и фосфора некоторые бактерии выделяют РНА, который впоследствии служит для них источником дополнительной энергии. Это вещество обладает свойством образовывать полимеры, а главное – в отсутствие нужных бактерий устойчив к разложению. Полное разложение происходит за 7 – 10 недель.
3. Полилактид – материал, изготовленный из молочной кислоты. Молочная кислота – распространенное вещество, используемое большим количеством бактерий в энергетическом процессе. Такой полимер обладает высокой прочностью, прозрачностью и жа-

ростойкостью. На разложение в присутствии кислотолюбивых бактерий уходит до 90 дней. [44]

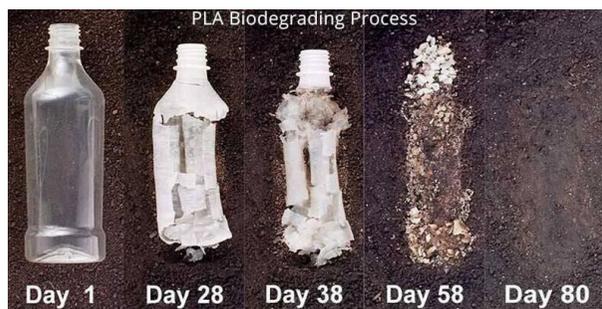


Рисунок 27 – Процесс разложения бутылки из биопластика

### Перовскит

Перовскиты – класс минералов с псевдокубической кристаллической структурой. Перовскит представляет собой любой материал с кристаллической структурой подобной природному минералу перовскиту ( $\text{CaTiO}_3$ ). Перовскиты – это смешанные оксиды металлов с формулой  $\text{ABX}_3$ , где А – катион металла группы s-, d- или f-элементов, В – катион малоразмерного переходного металла и  $\text{X} = \text{O}, \text{F}, \text{N}$ . Элементарная ячейка перовскита состоит из правильных октаэдров, образованных шестью анионами X, причем октаэдры  $\text{BX}_6$  соединены вершинами и образуют трехмерный каркас, в пустотах которого располагаются катионы А, окруженные двенадцатью атомами X (правильные кубооктаэдры). Таким образом, структура является куби-

ческой с двумя типами катионных позиций.

Природные соединения с такой структурой – перовскит, лопарит и силикатный перовскит бриджманит. С момента открытия перовскитных солнечных элементов, которые содержат перовскиты на основе галогенида метиламмония и свинца, в 2009 году возник значительный исследовательский интерес к перовскитным материалам.

Перовскитовые материалы обладают множеством привлекательных свойств как с теоретической, так и с практической точки зрения.

Колоссальное магнитосопротивление, сегнетоэлектричество, сверхпроводимость, зарядовое упорядочение, спин-зависимый перенос, высокая термо-ЭДС и взаимодействие структурных, магнитных и электрон-транспортных свойств. Эти соединения используются в качестве датчиков и каталитических электродов в некоторых типах топливных элементов и являются кандидатами для устройств памяти и приложений спинтроники. Многие сверхпроводящие керамические материалы (высокотемпературные сверхпроводники) имеют перовскитоподобную структуру. Одним из ярких примеров является оксид иттрия-бария-меди, который может быть изолирующим или сверхпроводящим в зависимости от содержания кислорода.

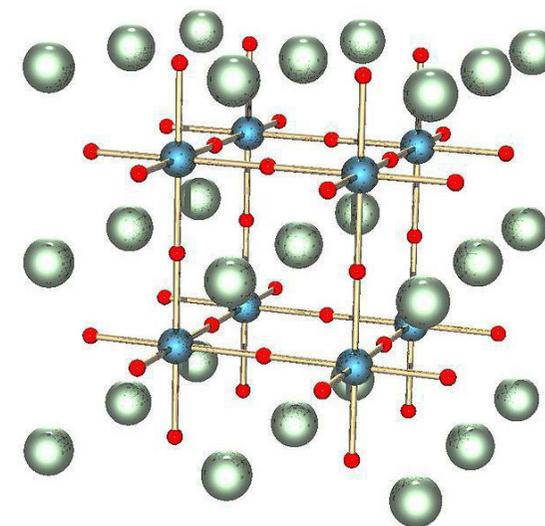


Рисунок 28 – Перовскит, кристаллическая решетка

Структура перовскита с общей химической формулой  $\text{ABX}_3$ . Красные сферы – это атомы X (обычно кислород), синие сферы – это атомы В (меньший катион металла, например  $\text{Ti}^{4+}$ ), а зеленые сферы – это атомы А (более крупный катион металла, такой как  $\text{Ca}^{2+}$ ).

## МЕТАЛЛОПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

В настоящее время нет обобщенных требований к составам металлических порошков, используемых в аддитивном производстве. Разные компании, которые изготавливают оборудование для аддитивного производства, предписывают определенный перечень материалов, обычно предоставляемых той же компанией. В разных машинах могут быть использованы порошки разного фракционного состава. Один из параметров, характеризующих порошок, — это величина  $d_{50}$ , обозначающая средний диаметр частиц. К примеру,  $d_{50} = 40$  мкм означает, что 50% частиц имеют размер меньше или равный 40 мкм.

Имеет место проблема с порошковыми материалами разных производителей. Нет гарантии, что покупка какого-то количества металлопорошка у одного производителя и дополнительного количества у другого приведет к получению продукта такого же качества. Все это диктует необходимость стандартизации порошков для АП. В этом случае требуется большая исследовательская работа, так как современные методы, используемые для оценки свойств материалов для традиционных технологий, не могут быть применены к технологиям АП из-за наличия анизотропии, которую нельзя избежать при послойном методе производства продукции.

Общее требование к материалам для АП — сферическая форма частиц. В первую очередь, это связано с тем, что такие частицы в определенном объеме могут

быть уложены более компактно. Во-вторых, должна быть обеспечена текучесть порошка в системах подачи материала при минимальном сопротивлении. Этого можно достичь тогда, когда частицы имеют сферическую форму.

Если порошок имеет слишком малый размер частиц, то в процессе построения легкие частицы будут «вылетать» из зоны расплава, что приведет к обратному результату — повышенной шероховатости детали, микропористости. Также, для того, чтобы вылетающие из зоны расплава частицы не попадали на соседние уже сплавленные участки поверхность строящегося слоя, внутри рабочей камеры создают направленный «ветер», который сдувает вылетевшие частицы в сторону. Это также может привести к слишком интенсивному выносу строительного материала из зоны построения. В силу этих причин при работе с мелкодисперсными порошками с  $d_{50} < 10$  мкм применяют маломощные лазеры, следовательно, малопроизводительные. Такие порошки (с соответствующими настройками машины) применяют в основном для изготовления микро-деталей, которые иным способом изготовить не представляется возможным.

Определенные трудности при работе с мелкодисперсными порошками возникают в связи с их повышенной склонностью к комкованию. Это накладывает особые требования к условиям хранения материалов и эксплуатации машин для аддитивного производства.



Рисунок 29 — Металлические порошки для аддитивного производства

### Методы получения металлических порошковых материалов для аддитивных технологий.

Способов получения металлических порошков делят на:

- физико-химические;
- механические.

Физико-химические технологии включают технологии, связанные с физическим и химическим преобразованием сырья. При этом химический состав и структура конечного продукта — порошка — существенно отличаются от исходного материала.

Механические процессы обеспечивают получение порошка из сырья без значительного изменения химического состава. Механические процессы включают множество вариантов измельчения в мельницах и

диспергирования расплава с помощью газовых или жидкостных струй. Этот процесс также известен как атомизация.

Частицы порошка, полученные измельчением механическими методами, имеют неправильную фрагментированную форму. Полученный порошок содержит относительно большое количество примесей – продуктов износа измельченных тел и мельничной футеровки. Поэтому эти методы не используются для получения порошков, используемых в аддитивных технологиях.

Диспергирование расплава является наиболее производительным, экономичным и эффективным способом получения мелких и средних металлических порошков. Используя данную технологию, получают 60–70% объема всех промышленных порошков. Распыление (атомизация) широко применяется при производстве порошков из многокомпонентных сплавов, особенно с аморфной структурой, позволяя добиться однородного химического состава композиции, даже если содержание компонентов сплава превышает их предел растворимости в основном компоненте сплава. Кроме того, порошки, полученные методами диспергирования в расплаве, имеют форму частиц, близкую к сферической.

Более 90% всех порошков, используемых в аддитивных технологиях, производятся путем диспергирования расплава.

### Основные технологии производства порошков для аддитивных устройств:

- газораспыление (виды технологий – водное и масляное распыление);
- вакуумное распыление;
- центробежное распыление.

### Газовая атомизация

При технологии газовой атомизации металл плавится в плавильной камере (обычно в вакууме или в инертной атмосфере), а затем контролируемым образом сливается через специальное устройство – распылитель, где поток жидкого металла разрушается струей инертного газа под давлением. Для получения мелкодисперсных порошков  $t = 10\text{--}40$  мкм. Так называемые распылители VIM (вакуумно-индукционная плавка) чаще всего используются в аддитивных технологиях, где камера плавления и камера распыления вакуумируются для минимизации контакта расплава с кислородом и азотом непосредственно перед процессом распыления. Распылительная камера заполнена инертным газом при атмосферном давлении, и в плавильной камере накапливается избыточное давление. И та же технология получения порошков с помощью вакуумных плавильных машин называется VIGA – Vacuum Induction Melt Inert Gas Atomization, т.е. «Технология газовой распыления металла, расплавленного в вакуумной камере путем индукционного нагрева».

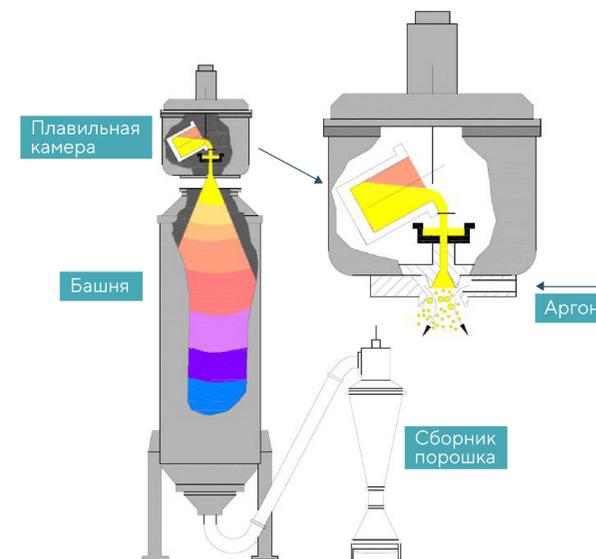


Рисунок 30 – Атомайзер VIGA

Технология индукционной плавки электрода с распылением газом (EIGA) представляет собой другой тип газовой атомизации. Эту технологию разработали для производства порошков химически активных металлов – TL, Zr, Hf, V, Pt, Ir, Nb, Mo и других, поскольку плавление этих металлов в керамических тиглях затруднено даже в условиях вакуума и требует больших затрат энергии в холодном тигле.

Распылитель EIGA используется для получения металлического порошка путем распыления его в потоке аргона. По технологии EIGA стержни (так называемый исходный материал) после предварительного плавления плавятся индукционным способом в виде элект-

тродов и распыляются без использования тигля.

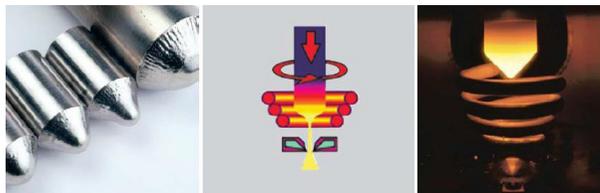


Рисунок 31—Исходный материал для получения порошка и схема процесса EIGA

Другой вид атомизации — технология плазменного распыления. В России наиболее распространена технология плазменного распыления быстро вращающегося электрода (PREP — Plasma Rotating Electrode Process), когда энергия плазменной струи подводится к концу электрода, вращающегося со скоростью 15 000-22 000 об/мин. Частицы порошка образуются под действием центробежных сил. Эта технология отличается большей сферичностью получаемых гранул и их большим размером по сравнению с газовым распылением. Использование новых плазмотронов и увеличение скорости вращения электрода позволило перенести основной рабочий диапазон в область, подходящую для аддитивных технологий, и получить достаточно высокий выход для частиц размером 40-100 мкм.

Помимо технологии PREP, за рубежом распространилась технология плазменной атомизации, при которой плавление металла осуществляется с помощью нескольких плазмотронов, которые при контакте с распыляемым материалом (электродом или проволокой)

в фокусной точке обеспечивают плавление и диспергирование образующихся капель плавления.



Рисунок 32 —Плазменная атомизация

### Вакуумная атомизация

Процесс вакуумного распыления в зарубежной литературе часто называют атомизацией за счет растворенного в расплаве газа (soluble gas atomization). Суть его в следующем. Распылитель состоит из двух камер — плавильной камеры внизу и распылительной камеры вверху. В плавильной камере создается избыточное давление газа — водорода, гелия, азота, который растворяется в расплаве. Во время распыления металл под действием давления в плавильной камере течет вверх к сопловому аппарату, который выходит в распылительную камеру, где создается разрежение.

В результате перепада давления растворенный газ выходит на поверхность капель расплава и «взрывает» их изнутри, образуя наноразмерные сферические гранулы порошка металла.[6]

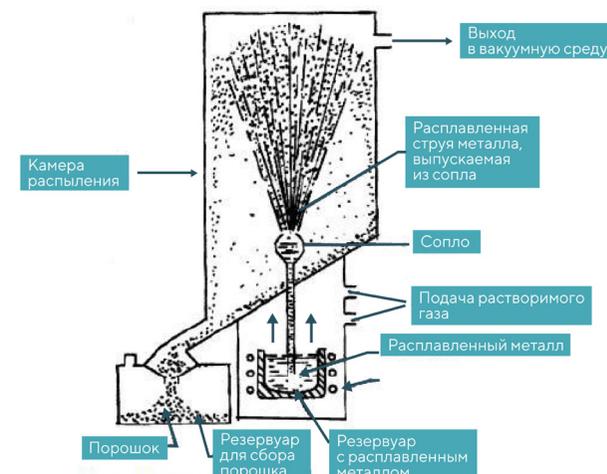


Рисунок 33 — Атомизация за счет растворенного в расплаве газа

## СОСТАВ (СТРУКТУРА) ТЕХНОЛОГИИ И КЛАССИФИКАЦИЯ

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Композиционные материалы классифицируют:

- по геометрии наполнителя;
- по схеме расположения наполнителей в матрице;
- по природе компонентов.

По структуре композиты делятся на несколько основных классов:

- волокнистые;
- слоистые;
- дисперсно-упрочненные;
- упрочненные частицами;
- нанокompозиты.

Волокнистые композиты армированы волокнами или нитевидными кристаллами. Механические свойства композита могут изменяться за счет ориентации размера и концентрации волокон. Кроме того, армирование волокнами позволяет придать материалу анизотропию свойств (различие свойств в разных направлениях).

За счет добавки волокон проводников можно придать материалу электропроводность вдоль заданной оси.

В слоистых композиционных материалах матрица и наполнитель располагаются слоями.

Остальные классы композиционных материалов характеризуются наполнением матрицы частицами армирующего вещества, различающегося дисперсностью частиц. Так, дисперсно-упрочненные композиты включают от 1 до 15% (по объему) частиц размером от 0,01 до 0,1 мкм. Композиты, упрочненные частицами, содержат 20–25% (по объему) частиц размером более

1 мкм. Размеры частиц, входящих в состав нанокompозитов, составляют 10–100 нм. [2]

Согласно такой характеристике, как «связность» один из образующих компонентов, называется матрицей. Другие компоненты, которые усиливают или упрочняют матрицу, могут иметь вид «несвязных» частиц, нитей, волокон, пластин, изолированных друг от друга или в виде связанной конструкции, наподобие армирующей «сетки» в железобетонной конструкции.

Признаки классификации армированных композитных материалов:

- материал компонентов;
- тип арматуры и ее ориентации;
- способ получения композиции и изделий из них;
- по назначению.

В зависимости от материала матрицы все композиционные материалы разделены на четыре группы:

- композиции с металлической матрицей (металлические КМ);
- композиции с полимерной матрицей (полимерные КМ);
- композиции с керамической матрицей (керамические КМ);
- дисперсионно упрочненные сплавы.

Полимерные композитные материалы (ПКМ) обычно называют в зависимости от материала армирующих волокон. ПКМ, армированные стекловолокном, на-

зываются стеклопластиком или стекловолокнистыми, металл – металлопластиком или металловолокнистыми, органическим – органопластиком или органоволокнистыми, борным – боропластиком или бороволокнистыми, углеродом – углепластиком или углеволокнистыми, асбест – асбопластиком или асбоволокнистыми и другие.

В отношении металлических и керамических КМ пока отсутствуют четко установленные правила присвоения названий. Чаще других вначале пишут материал матрицы, затем материал волокна. Например, обозначение “медь – вольфрам” (Cu-W) относится к конструкционным материалам с медной матрицей и вольфрамовыми волокнами; “оксид алюминия – молибден” (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Mo) – к КМ на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с арматурой из молибденовых проволок. В зависимости от исходного, структурного и фазового состояния матричного материала различают МКМ с порошковой, литой и листовой матрицей. КМ, набирающиеся из чередующихся слоев волокон и тонких листов матричного материала называют иногда КМ типа “сэндвич”. Для получения ККМ чаще всего используют матрицу в виде порошка. В настоящее время отсутствуют четкие правила наименования металлических и керамических композитных материалов. В большинстве случаев сначала указывается материал матрицы, а затем волокна.

В зависимости от исходного, структурного и фазового состояния материала матрицы металлических композитов различают:

- порошковую;
- расплавленную;
- листовую матрицу.

КМ, состоящие из чередующихся слоев волокон и тонких листов материала матрицы, называют композитный материал типа «сэндвич». Для получения керамических КМ чаще всего используется матрица в виде порошка.

По ориентации и типу арматуры все композитные материалы можно разделить на две группы:

- изотропные;
- анизотропные.

Изотропные материалы имеют одинаковые свойства во всех направлениях. К изотропным КМ относятся дисперсионно-упрочненные и хаотично-армированные материалы. В первом случае армирующие элементы имеют примерно равноосную форму, во втором случае упрочнение осуществляется короткими игольчатыми частицами, которые хаотично ориентированы в пространстве. В виде таких частиц обычно используют куски волокна или нитевидные кристаллы— усы; в этом случае КМ являются квазиизотропными, то есть анизотропны в микрообъемах, но изотропны по объему всего изделия. Анизотропные материалы — это материалы, свойства которых зависят от направления. К таким композитам относятся материалы, волокна которых ориентированы в определенных направлениях: однонаправленные, слоистые и трехмерно армиро-

ванные.

По форме армирующие волокна делятся на три основные группы:

- нульмерные наполнители, которые имеют в трех направлениях одинаково малые размеры одного порядка;
- одномерные наполнители, которые имеют размеры в двух направлениях и размер, который значительно превосходит их в третьем измерении (волокна);
- двумерные наполнители имеют два размера, которые соизмеримы с размером самого материала, и значительно превосходят третий (пластины, ткань).

Анизотропия конструкционных материалов носит структурный характер — она специально включается в материалы для изготовления конструкций, где это желательно. Также существует технологическая анизотропия, которая возникает в результате воздействия пластической деформации на изотропные материалы (металлы), и физическая анизотропия, которая присуща кристаллам из-за особенностей строения их кристаллической решетки.

В технике, как правило, используются анизотропные материалы с определенной симметрией свойств. При изучении его физико-механических свойств реальный материал, как правило, весьма неоднородный, представляется как некая идеальная сплошная, однородная среда, имеющая симметрию структуры и свойств.

К анизотропным относят материалы со следующими

типами укладки волокон:

- Продольно-поперечная укладка — в этом случае используются нульмерные, одномерные и двумерные наполнители. Нульмерные и одномерные наполнители размещаются в параллельных друг другу плоскостях. Одномерные наполнители также располагаются в параллельных плоскостях, при том, что они лежат параллельно в пределах каждой плоскости и под разными углами относительно других плоскостей. Двумерные наполнители располагаются параллельно друг другу.

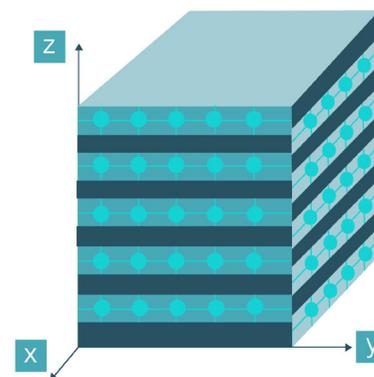


Рисунок 34 — Схематическое изображение структуры КМ с продольно-поперечной укладкой волокон

- Однонаправленные композиты — в этом виде армирования используются нульмерные и одномерные наполнители. Нульмерные расположены таким образом, что расстояние между ними по одной оси намного меньше, чем по двум другим. Одномерные наполнители расположены параллельно друг другу.

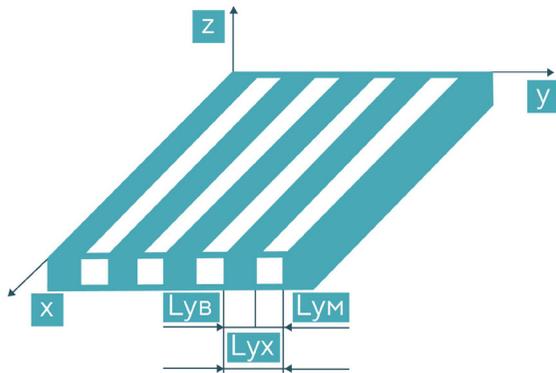


Рисунок 35 – Схематическое изображение структуры однонаправленного КМ (черные области волокна, белые – матрица)

Слоистые композиционные материалы, армированные в двух неортогональных направлениях под углом  $2\alpha$ .

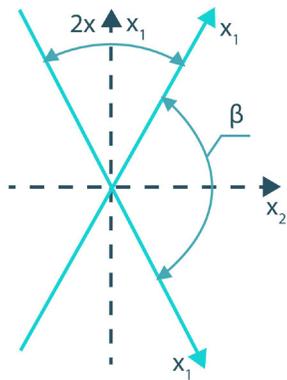


Рисунок 36 – Направления осей армирования в КМ с неортогональной укладкой волокон

Слоистые материалы со звездной укладкой волокон в смежных слоях.

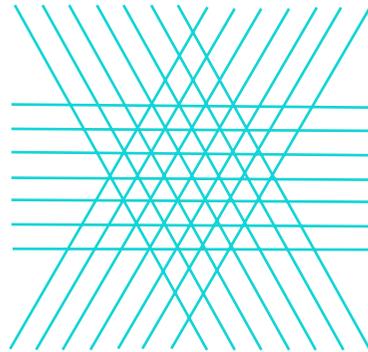


Рисунок 37 – Схема ориентации арматуры в слоистых КМ со звездной укладкой волокон в смежных слоях

С целью расширения набора свойств или улучшения каких-либо свойств одновременно используют наполнители различной формы. К примеру, для увеличения прочности связи между одномерными наполнителями, стеклянными или углеродными волокнами и полимерной матрицей, в неё вводится нульмерный наполнитель – частицы асбеста, карбид кремния и другие. С той же целью используется армирование наполнителями одинаковой формы, но отличного состава. Для увеличения модуля упругости композитов с полимерной матрицей, армированной стекловолокном, дополнительно вводятся волокна бора. Для армирования композитов двумя последними способами используют нульмерные и одномерные наполнители.

Армирующие наполнители имеют возможность располагаться в матрице отдельно, не быть в связанном состоянии друг с другом, и также могут образовывать различного рода сплетения.

Композиты, содержащие два и более различных наполнителя, называются полиармированными. По способу получения полимерные конструкционные материалы разделяют на:

- литейные;
- прессованные;
- намоточные.

Полимерные КМ с хаотичной структурой, как правило, получают методом литья и прессованием, а с ориентированной структурой – методом намотки и прессованием.

Металлические композиты по данному способу делят на:

- литейные;
- деформируемые.

Литейные получают, пропитывая арматуру расплавленным матричным сплавом, либо применяя направленную кристаллизацию сплавов эвтектического состава с выделением упрочняющей армирующей фазы непосредственно из расплава (так называемый метод «in situ» – в себе, на месте пребывания). Для получения деформируемых МКМ применяют спекание, горячее прессование, диффузионную сварку, горячую штамповку и ковку на молотах, взрывное прессование, электролитическое, химическое напыление и др.

Большинство этих твердофазных методов, за исключением динамических, также используется для получения керамических КМ.

По назначению композитные материалы можно разбить на:

- общеконструкционного назначения (для различного рода несущих конструкций самолетов, ракет, судов, автомобилей, двигателей, сосудов высокого давления, предметов широкого потребления и др.);
- жаропрочные (для лопаток турбин, камер сгорания и других изделий, работающих при повышенных температурах);
- термостойкие (для изделий, работающих в условиях резких теплосмен, например для облицовки каналов МГД-генераторов);
- фрикционные и антифрикционные (подшипники скольжения, шестерни и др.);
- ударопрочные (броня самолетов, танков и т.п.);
- теплозащитные и КМ со специальными свойствами (электрическими, магнитными, ядерными и др.). [7]

### УМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Умные материалы классифицируются по их основному функциональному свойству или их комбинаций:

- самовосстанавливающиеся материалы, которые могут самостоятельно восстанавливаться — устранять возникающие в них дефекты;
- сплавы с «эффектом памяти» после деформации восстанавливают свою первоначальную форму при нагреве;

- самосмазывающиеся материалы, которые уменьшают трение или износ. Они применяются в виде покрытий, обладающих твердостью для уменьшения износа или низкой поверхностной энергией для уменьшения адгезии и трения. Также самосмазывающиеся материалы разрабатываются в виде композитов с наполнителями из металлов, полимеров или керамики и матрицей, обеспечивающей структурную целостность. Очень распространено использование с этой целью графита;
- самоочищающиеся материалы, отталкивающие воду, органические жидкости и прочие загрязнения;
- пьезоэлектрики вырабатывают электричество при приложении механической нагрузки. Или же наоборот при приложении электрического напряжения материал может изгибаться, расширяться или сжиматься;
- фотомеханические материалы, изменяющие форму под воздействием света;
- магнитореологические жидкости — их реологические свойства изменяются при наложении магнитного поля. В отсутствие магнитного поля такие жидкости представляют собой суспензию хаотически расположенных магнитных микрочастиц (чаще всего железа) в жидкости (различные масла и др.). В магнитном поле частицы выстраиваются в цепочки вдоль силовых линий, резко увеличивая тем самым вязкость в направлении перпендикулярном направлению поля;
- магнитострикционные материалы — меняют форму в магнитном поле. Имеет место и обратный эффект — при приложении механической нагрузки, у образца

изменяется намагниченность;

- электрострикционные материалы — похожи на магнитострикционные, с той лишь разницей, что прикладывается электрическое поле;
- электрохромные материалы, меняющие оптические свойства при электрических воздействиях. Примером таких «умных» материалов являются жидкокристаллические дисплеи;
- пирозлектрики — при изменении температуры вырабатывают электричество и наоборот;
- умные гели, способные сжиматься или набухать по сравнению с исходными габаритами на порядки (до 1000 раз). [8]

### МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ

Классификация порошковых материалов устанавливается по следующим критериям:

- функциональному назначению;
- элементу основы (матрицы);
- структуре материала;
- термической обработке;
- способу изготовления заготовок.

По функциональному назначению порошковые материалы подразделяются:

- на высокопрочные для работы при комнатной (нормальной) температуре (около 20°C);
- материалы, работающие при повышенных температурах;
- материалы, работающие при пониженных температурах;

- высокомодульные;
- коррозионно-стойкие;
- размеростабильные в условиях термоциклирования.

Для порошковых материалов для работы при повышенных и пониженных температурах диапазоны температур указываются в нормативных или технических документах на конкретные материалы.

Порошковые материалы по элементу основы (матрицы) подразделяются на материалы:

- на основе алюминия;
- на основе бериллия;
- на основе железа;
- на основе магния;
- на основе никеля;
- на основе титана;
- на основе ниобия;
- на основе хрома;
- на основе меди;
- на основе серебра;
- на основе цинка;
- на основе свинца;
- на основе тугоплавких металлов;
- на интерметаллидной основе.

Порошковые материалы по структуре подразделяются на материалы, приведенные ниже на рисунке

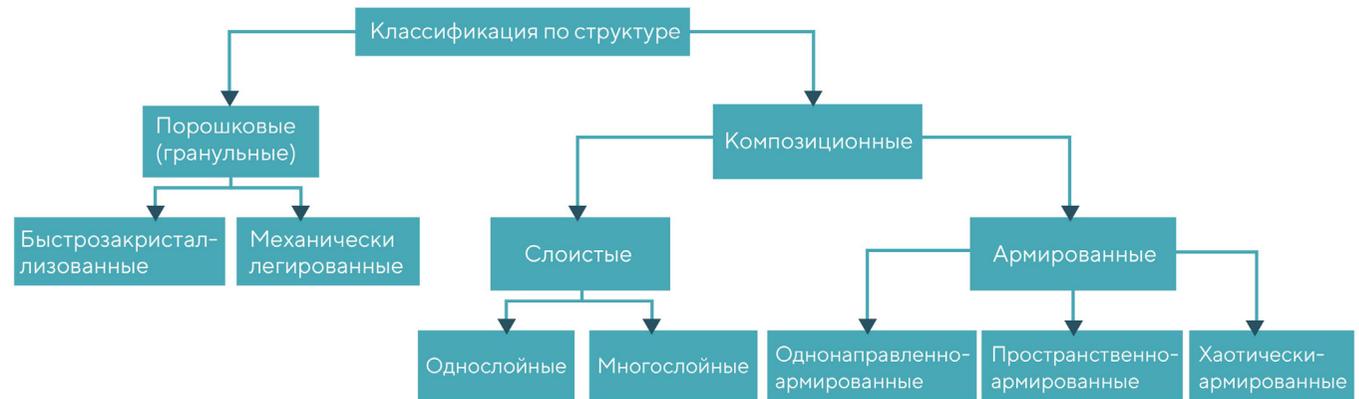


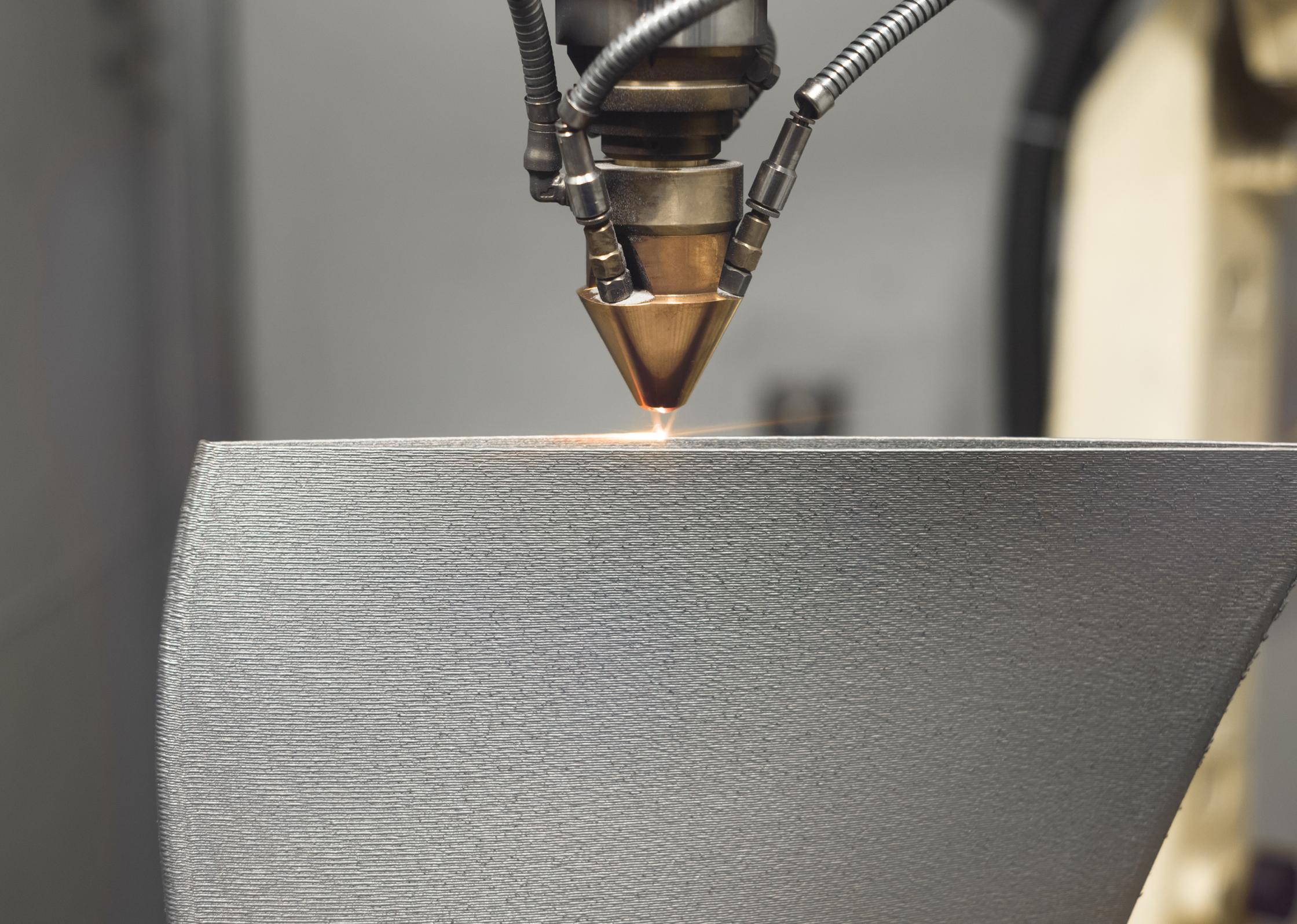
Рисунок 38 – Классификация порошковых материалов по структуре

По влиянию термической обработки порошковые материалы подразделяются:

- на упрочняемые термической обработкой;
- неупрочняемые термической обработкой;
- отожженные.

По способу изготовления заготовок порошковые материалы подразделяются:

- на спеченные;
- прессованные;
- напыленные;
- наплавленные;
- формованные;
- получаемые методом ГИП;
- комбинированные.[29] материалы, но в то же время уступать по другим.



## ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЕХНОЛОГИИ

### ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ТЕХНОЛОГИИ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

При проектировании композиционных материалов разработчик может придать ему определенные характеристики, которые в значительной степени будут превосходить по аналогичным параметрам традиционные материалы, но в то же время уступать по другим.

#### Основные преимущества КМ:

- высокая прочность;
- высокая жесткость;
- высокая усталостная прочность;
- малый удельный вес;
- сопротивление «старению материала»;
- малая подверженность износу.

#### Основные недостатки КМ:

- анизотропия — одни и те же свойства могут в десятки раз различаться в зависимости от направления внешнего воздействия (вдоль волокон или поперек);
- большой удельный объем;
- гигроскопичность, так как КМ неоднородны по определению, то они имеют свойство впитывать влагу;
- токсичность — при изготовлении и эксплуатации данные материалы способны выделять вредные для здоровья человека пары;
- повышенная наукоемкость производства, необходимость специального дорогостоящего оборудования и сырья, а следовательно, развитого промышленного производства и научной базы;
- высокая цена — это объясняется тем, что при произ-

водстве композитных материалов довольно часто используется дорогостоящее оборудование, что отражается на их себестоимости. [11]

### УМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Преимущества умных материалов:

- возможность задавать определенные свойства материала и использовать их в зависимости от задачи;
- расширение возможностей уже существующих материалов путём интеграции с ними;
- комбинирование свойств различных типов умных материалов, путём их совместного использования в одной структуре (например аэрогель с нанотрубками).

#### Недостатки умных материалов:

- На данный момент существуют проблемы с производством многих материалов данной группы в промышленных масштабах, поэтому их серийное использование ограничено.
- Высокая стоимость производства.

К данной группе относится большое количество материалов, каждый из которых обладает своим набором свойств.

Преимущества и недостатки должны анализироваться индивидуально в зависимости от целей и назначения применяемого умного материала.

### МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ

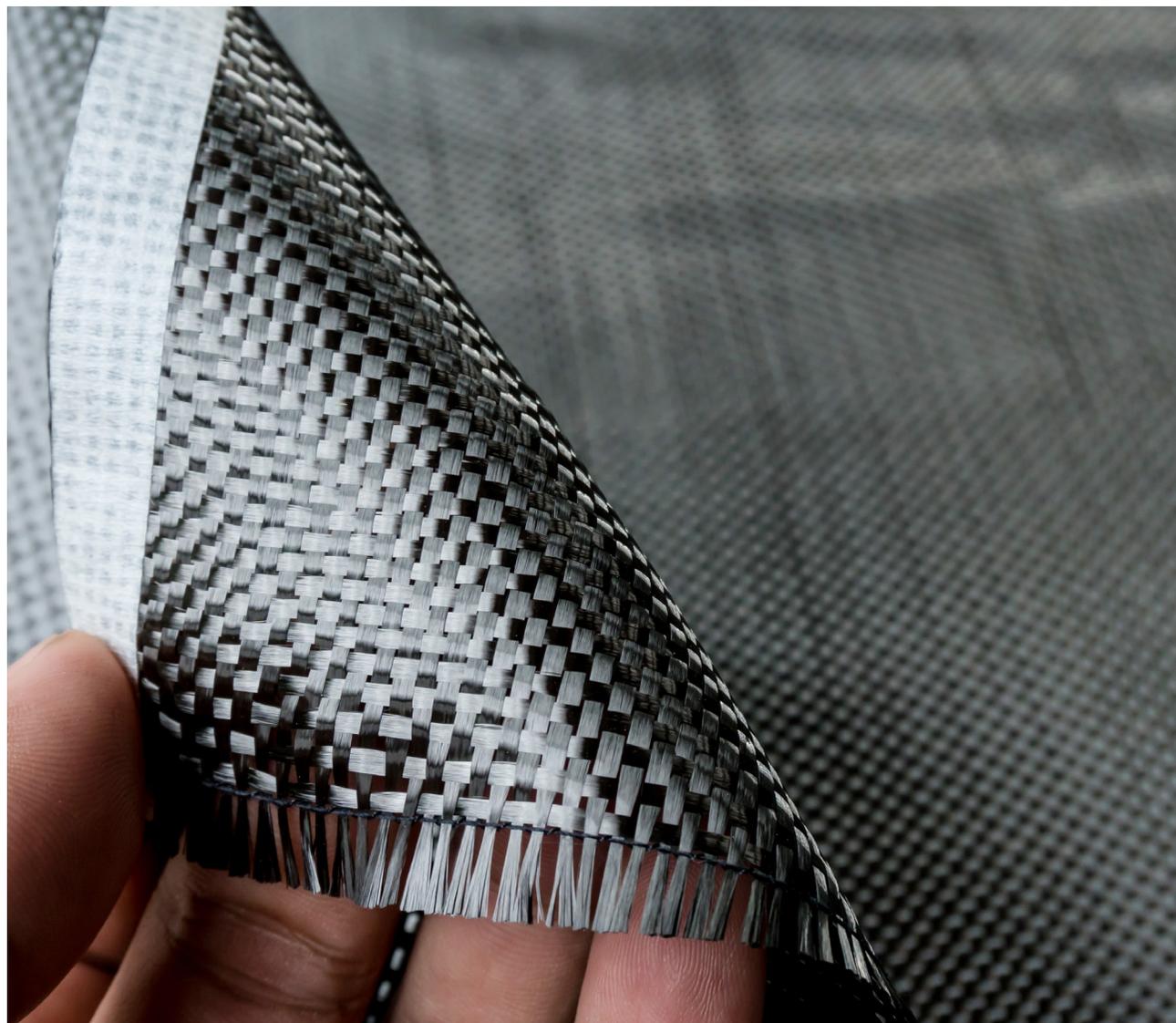
Преимущества металлических порошков:

- снижаются затраты на дальнейшую механическую обработку, которая может быть существенно умень-

шена или даже полностью исключена, так как получаемое готовое изделие имеет высокую точность формы и размеров. Обеспечивается малая шероховатость поверхности изделия;

- уменьшается число операций в технологической цепи изготовления продукта;
  - используются энерго- и ресурсосберегающие технологии: коэффициент использования стартового сырья составляет более 97 %, а в большинстве случаев коэффициент использования материала составляет около 100%;
  - использование порошковой металлургии позволяет получать изделия с уникальными свойствами, используя многокомпонентные смеси, объединяя металлические и неметаллические компоненты, а также изделия различной пористости (фильтры) с регулируемой проницаемостью, подшипники скольжения с эффектом самосмазывания и т.д.;
  - сборочные этапы изделия реализуют на стадии спекания;
  - получаемые изделия имеют более высокие экономические, технические и эксплуатационные характеристики по сравнению с изделиями, изготовленными по традиционным технологиям;
  - использование порошковой металлургии обеспечивает прецизионное производство и малый разброс размеров в серии изделий.
- Недостатки металлических порошков:
- высокая стоимость самого материала;

- необходимость спекания в защитной атмосфере, что увеличивает себестоимость изделий;
- трудность изготовления изделий и заготовок больших размеров;
- сложность получения металлов и сплавов в компактном состоянии;
- необходимость применения чистых исходных порошков для получения чистых металлов. [9]



## ОСНОВНЫЕ ТРЕНДЫ

В ближайшем будущем ожидается появление наноструктурированных материалов и реагентов для очистки воды, водоподготовки и пищевой промышленности.

С переходом на эти технологии будут в значительной степени решены проблемы обеспечения людей питьевой водой и эффективной очистки бытовых и промышленных сточных вод, например, за счет использования различных типов гибридных мембран со встроенными наночастицами. Значительно интенсифицировать процессы очистки воды можно за счет использования новых типов ультра- и нанофильтрационных мембран, мембран с асимметричным (градиентным) распределением наночастиц – за счет перестройки поровых систем и мембранных каналов, за счет внедрения электромембранных технологий, позволяющих повысить электрокаталитическую активность мембран с внедренными наночастицами в реакцию диссоциации воды, увеличение скорости ее очистки электродиализом в режиме сверхпределных токов. Ионообменные и мембранные материалы, содержащие наночастицы металлов, используются для глубокого удаления растворенного кислорода из воды, что чрезвычайно важно во многих процессах современной электронной промышленности. Фильтры и ионообменные мембраны будут широко использоваться в производстве и переработке пищевых продуктов.

С появлением наноструктурированных биосовместимых и биорезорбируемых материалов структура

рынка протезов и имплантатов, принципы и подходы к протезированию радикально меняются. Внедрение новых технологий увеличит продолжительность активной жизни человека, снизит степень инвалидности населения, улучшит качество жизни людей.

Использование систем доставки лекарств приведет к радикальному повышению эффективности лекарственной терапии. Высокопористые наночастицы или нанокapsулы могут быть использованы в качестве носителя лекарств. Системы адресной доставки способствуют экономному расходу лекарственных веществ и снижению уровня токсичности, тем самым значительно уменьшая их побочные эффекты.

**Материалы, отличающиеся легкостью и высокой прочностью, могут быть созданы на основе наноструктурированных сплавов алюминия, титана и некоторых других металлов.**

**Наиболее востребованными будут следующие товары:**

- высокопрочные смеси на основе наноструктурированных конструкционных полимеров;
- полимерные композиционные материалы с добавлением небольшого количества углеродных наночастиц;
- композитные материалы повышенной прочности на основе наноматериалов с использованием древесины;
- наноструктурированные композиционные материалы на основе легких металлов (Al, Ti, Mg), содержащие

нановолокна полиэтилена с очень высокой молекулярной массой и др.

Усилия многих исследовательских групп сосредоточены на разработке технологий наноструктурированных материалов для химических источников энергии. Их использование увеличит удельную емкость электродов, увеличив мощность источников и обеспечив их миниатюризацию и высокую безопасность. Увеличение рабочих температур этих источников энергии также является важным параметром. К наиболее перспективным химическим источникам тока относятся:

- литий-ионные аккумуляторы;
- топливные элементы.

**Эти устройства смогут использовать широкий диапазон нанотехнологических материалов, используемых для создания различных типов источников энергии, в частности:**

- Гибридные протонпроводящие наноструктурированные мембраны с включениями наночастиц, улучшающие их транспортные свойства, и нанометрические катализаторы на основе платины и переходных металлов, включая так называемые катализаторы типа «ядро в оболочке», используемые для создания батарей;
- Наноразмерные катодные и анодные материалы со смешанной электропроводностью и наноструктурированные материалы на основе различных форм кремния и углерода, которые являются основой для создания литий-ионных аккумуляторов. Рядом с ними

расположены катализаторы для производства инновационных носителей энергии и химических продуктов, многие из которых уже используются в производстве;

- Эффективные наноразмерные катализаторы для глубокой переработки сырой нефти и природного газа;
- Наноразмерные катализаторы преобразования природного в жидкое топливо, водород и ценные органические продукты;
- Наноразмерные катализаторы для преобразования возобновляемых ресурсов (биогаза и биомассы) в ценные органические продукты;
- Широкий диапазон наноразмерных катализаторов для производства и переработки природных энергоносителей;
- Нанометрические мембраны на основе сложных оксидов со структурой перовскита, шпинели и флюорита, используемые для частичного окисления метана в синтез-газе при низких температурах, или нанометрические катализаторы для конверсии продуктов биомассы в синтез-газ.

Излучатели на основе наногетероструктур, включая лазеры и органические светодиоды, имеют широкие перспективы. Последние являются одним из самых экономичных источников света, отличаясь уникальным тонким исполнением и большой гибкостью, обеспечивая широкий диапазон света и геометрию светового потока, привычную человеку. Они могут быть выполнены практически произвольной формы и «вписаться» в рабочие и жилые помещения различ-

ного размера. Лазеры уже активно используются в медицине, машиностроении, строительстве и геодезии, при создании интегральных схем и печатных плат. Они используются для обнаружения различных веществ (в том числе взрывчатых), для нагрева при термоядерном синтезе, в астрономии. Термостойкие наноструктурированные композиты, керамика и металл имеют большой потенциал для использования во многих отраслях промышленности (авиастроение, энергетика и др.) из-за их устойчивости к химическому разложению при высоких температурах.

**Среди этого ассортимента инновационных продуктов выделяют:**

- углерод-углеродные конструкционные материалы с максимальной температурой эксплуатации до 1650 °С;
- легкие, высокопрочные слоистые композитные металл-интерметаллидные материалы, пригодные для работы при высоких температурах и критических по температурным градиентам;
- термостойкие композиционные покрытия, армированные наноразмерными силицидами, повышающие температуру и срок службы изделий, а также их надежность в 1,5 раза;
- композиты из углеродного волокна с металлической матрицей для производства термостойких конструкционных изделий с заданной наноструктурой.

Большую группу инновационных продуктов составляют наноструктурированные композитные материалы со специальными свойствами (включая электропроводящие, магнитные и оптические), предназначен-

ные для передачи и преобразования электрического тока. Основные области применения этого типа материалов развиваются в направлении передачи тока большой мощности и миниатюризации устройств. Наноструктурированные композиты с особыми оптическими свойствами, в том числе фотонные кристаллы, будут пользоваться большим спросом. В среднесрочной перспективе ожидается использование систем с сенсорными свойствами, такими как способность изменять диапазон или интенсивность излучаемого света при взаимодействии с определенными реагентами. Возможна значительная оптимизация основных функциональных параметров волоконно-оптических линий связи, обеспечивающих надежно экранированный многоканальный способ передачи информации – скорость и качество передачи – с одной стороны, за счет использования наноструктурированных материалов, с чрезвычайно высоким уровнем невосприимчивости к помехам, с другой стороны, не являясь источником излучения. Использование фотонных кристаллов и микроструктурированных волокон открывает новые возможности использования оптических волокон в датчиках физических величин.

**Наноструктурированные антифрикционные и адгезионные материалы найдут широкое применение в различных отраслях промышленности. К наиболее перспективным материалам и изделиям этой группы относятся:**

- сепараторы для высокотемпературных подшипников, которые могут работать в агрессивных средах без

смазки;

- неорганические композиты, содержащие углеродные нанотрубки и графен;
- подшипники с наноразмерными модифицирующими добавками;
- износостойкие наноструктурированные композиционные материалы, полученные с помощью специальной порошковой заготовки;
- полимерные смазки с инертными наночастицами ZnO, SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, SiC, карбид и нитрид вольфрама и титана для улучшения механических свойств;
- многослойные нанокомпозитные полимерные покрытия для внутренней обработки трубопроводов, снижающие коэффициент трения и т.д.

**Нано- и микроробототехнические системы представляют интересными для использования в медицине – для создания хирургических устройств нового поколения. В этой группе перспективными продуктами являются:**

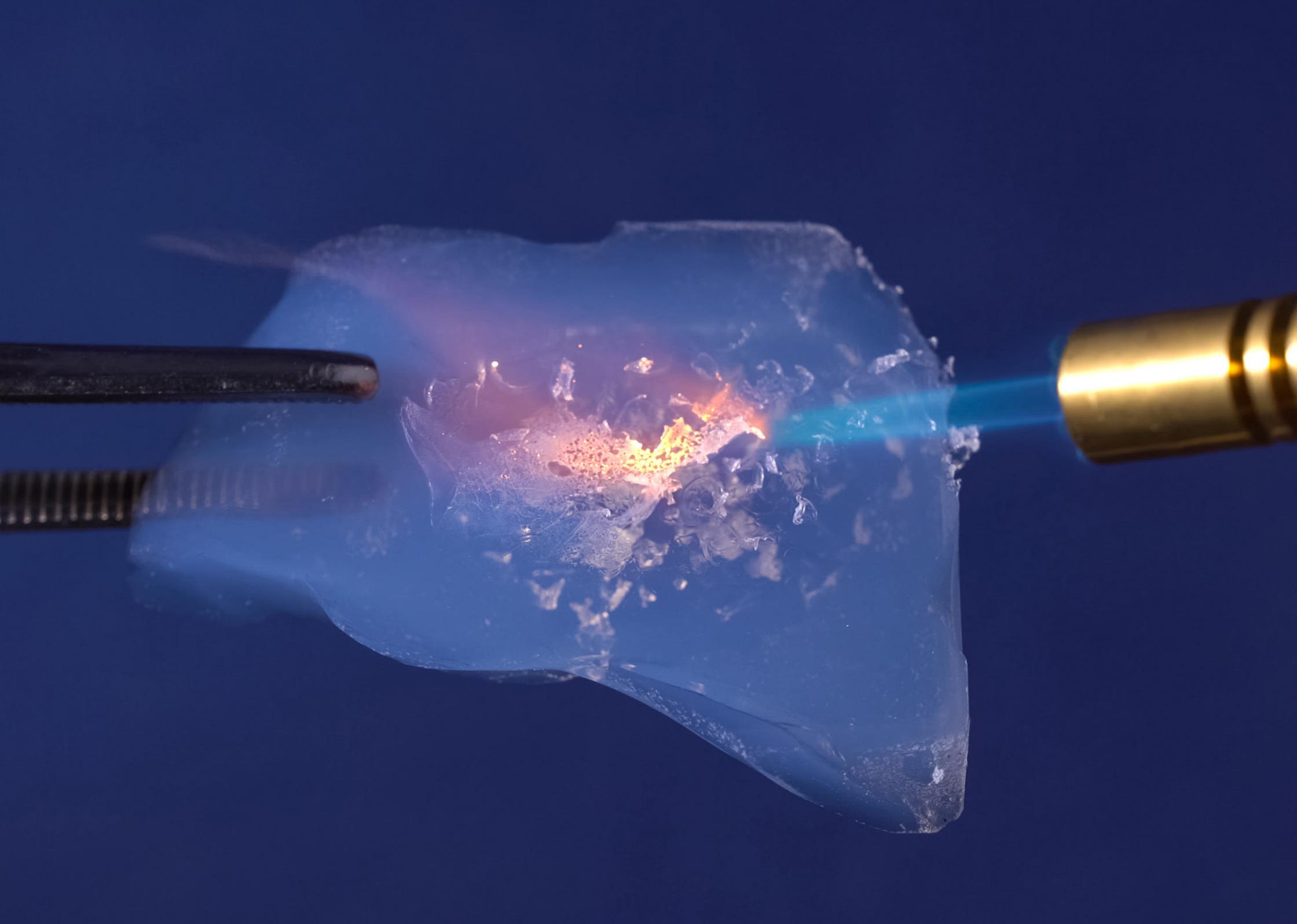
- мобильные элементы нано- и микроробототехнических систем на основе слоистых нанокомпозитных материалов;
- сложное оборудование на базе мехатронных модулей для обработки деталей сложной формы;
- активные наноструктуры на основе магнитоупругих и мультиферроидных материалов с искусственно вызванными критическими состояниями, предназначенные для микроэлектромеханических систем;
- мехатронные модули пространственного позиционирования наносистем и нанотехнологического оборудования на базе шаговых микроэлектродвигателей, роликовинтовых пар и микропроцессорных систем управления.

Важным прорывом в электронной промышленности станет разработка электронных элементов на основе графена, фуллеренов, углеродных нанотрубок и квантовых точек. Электронные устройства, разработанные на их основе, при очень малых габаритах и весе будут иметь очень высокие функциональные параметры. Предполагается, что после освоения диапазона частот до нескольких терагерц и значительного увеличения быстродействия компьютерных систем могут быть созданы принципиально новые устройства связи с беспрецедентной пропускной способностью канала. Это откроет новую нишу для высокоскоростных сетей передачи данных малого радиуса действия и полностью исключит использование кабелей при подключении аудио- телевизионного и оборудования, при передаче многопоточкового видео высокой четкости.

Графеновые фотодиоды, используемые в качестве фотоприемников терагерцового диапазона, могут быть встроены в компактные системы безопасности (для обнаружения оружия, наркотиков, взрывчатых веществ и т.д.). Новые возможности в создании нейроморфных вычислительных систем с принципиально новой архитектурой откроют электронные элементы на основе мемристоров. Это резко увеличит их производитель-

ность при решении плохо алгоритмических задач на классических компьютерах и существенно снизит удельное энергопотребление. В области «умной» электроники появится возможность управлять изменением электросопротивления функциональных материалов при длительном хранении заданного состояния, что позволит использовать эти структуры как аналоги синапсов в аппаратной части нейронных сетей и при построении нейроморфных вычислительных систем.[10]

ность при решении плохо алгоритмических задач на классических компьютерах и существенно снизит удельное энергопотребление. В области «умной» электроники появится возможность управлять изменением электросопротивления функциональных материалов при длительном хранении заданного состояния, что позволит использовать эти структуры как аналоги синапсов в аппаратной части нейронных сетей и при построении нейроморфных вычислительных систем.[10]



## ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ

**Среди основных областей применения новых материалов можно выделить следующие:**

- градиентные покрытия на основе нанокompозитов для эффективной защиты узлов и агрегатов от внешних факторов;
- композиционные интерметаллидные наноструктурированные покрытия для защиты конструкций в экстремальных условиях;
- углеволокнистые композиты с керамической матрицей на основе высокопрочных, высокомодульных нитей с пониженной массой и повышенной термостабильностью для производства элементов конструкции самолетов, ракет и космических станций;
- конструкционные материалы нового поколения с новой архитектурой и свойствами, в первую очередь механическими: повышенными прочностью, пластичностью, твердостью, трещиностойкостью, сопротивлением усталости и др.;
- функциональные материалы нового поколения с новыми свойствами (оптическими, транспортными, излучательными и др.), обусловленными наличием структурных элементов наномасштабных размеров;
- многоядерные процессоры на основе фотонных нанопереклюателей, повышающие пропускную способность внутрочиповых соединений при снижении энергопотребления;
- материалы для производства солнечных батарей, преобразующих до 90% световой энергии в электрическую. А также для батарей, использующих инфракрасный диапазон и коротковолновую область сол-

нечного спектра;

- новые материалы для альтернативных источников электроэнергии на основе нанотехнологий;
- сверхмощные керамические магниты для изготовления высокоэффективного электроэнергетического оборудования и его компонентов и др.
- костные импланты на основе биорезорбируемых нанокерамик и биокompозитов, поставляющие материал для достраивания живых тканей организма, заполнения костных дефектов и др.;
- создаваемые с использованием биосовместимых нанокompозитов на основе нанопористых соединений средства направленной доставки лекарств и воздействия на онкологические новообразования;
- нанокompозиты на основе плазмидных ДНК и интерферирующих РНК для направленной доставки генетического материала;
- устройства для прямого считывания последовательности нуклеотидов, изготовленные с использованием наноструктурированной поверхности;
- получение аэрогелей сверхнизкой плотности, которые могут быть использованы для черенковских детекторов, а также для проведения реакции контролируемого термоядерного синтеза.

### КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### Авиастроение

В авиационной технике в силу особенностей эксплуатации к материалам предъявляются высокие требования. Материалы, из которых изготовлен само-

лет, должны обеспечивать необходимую прочность и жесткость конструкции и обладать стойкостью к атмосферным воздействиям. При этом в материале должна быть предусмотрена возможность изготовления изделия сложной формы и по возможности без дополнительных крепежных элементов, увеличивающих вес самолета.

Благодаря своим качествам, высокому удельному сопротивлению, способности управлять структурой и формой изделий практически любой геометрии, легкости комбинирования с различными материалами композитные материалы нашли широкое применение в авиастроении.

Развитие авиастроительной промышленности связано с непрекращающейся борьбой за снижение массы конструкции. Данный результат может быть достигнут за счет рационального выбора материалов, использования рациональных технологических процессов, а также уточнения нагрузок, действующих на конструкцию.

При выборе материала опоры элементов конструкции необходимо учитывать его механические и теплофизические характеристики, удельный вес, коррозионную стойкость, стоимость и дефицитность сырья, а также возможность обработки материала с использованием современных технологических процессов.

**Выбор материала также зависит от размера и формы элемента конструкции и условий, при которых он испытывает нагрузки. Эти условия характеризуются следующими факторами:**

- значение, направление и продолжительность нагрузки;
- максимальная температура;
- тип нагрузки — постоянная, плавно меняющаяся, ударная, циклическая;
- наличие концентрации и другие.

Удельная прочность и жесткость композиционных материалов, повышенные по сравнению с традиционными металлическими конструкционными материалами, определяются свойствами армирующего волокна — наполнителя. Совместную работу волокон обеспечивает матрица — связующее.

Основная характеристика создания конструкции из композитных материалов, в отличие от традиционного использования металлов, заключается в том, что процесс проектирования изделия начинается с создания самого материала. В этом случае свойства материала формируются уже при изготовлении конкретной конструкции.

Проектирование материала и самой конструкции, а также разработка производственного процесса представляют собой единый взаимосвязанный процесс, в котором каждый компонент дополняет и определяет другие.

Минимальный вес конструкции самолета — один из основных критериев, определяющих безупречность его конструкции.

Её реализация зависит от правильного выбора материалов, конструкции элементов, изготовленных из

композитов и их параметров. За счет снижения веса конструкции и использования композитных материалов повышается экономическая эффективность самолета.

Применение полимерных композитов в силовой части конструкции пассажирского самолета позволяет не только снизить вес планера, но и повысить аэродинамические показатели. Повышение данных показателей и крейсерского числа Маха обеспечивается оптимальными значениями конструктивных параметров крыла — удлинения, стреловидности и относительной толщины его профиля, что недостижимо для металлической конструкции.

Поэтому для крыльев таких самолётов, как Ту-204, Boeing 737, Airbus A320 с удлинением  $\lambda = 9 \sim 10$  используется алюминий с модулем упругости 72 ГПа. Для удлинения крыла  $\lambda = 11 \sim 12$  использование алюминия приводит к дополнительному увеличению веса из-за необходимости увеличения жесткости крыла на изгиб. Следовательно, для крыла с удлинением  $\lambda > 10$  должен использоваться материал с высоким модулем упругости. Углепластик позволяет получить необходимую жесткость крыла за счет большего модуля упругости более 100 ГПа для готовой конструкции.

Использование композитов в современных магистральных самолетах достигает 50%. Например, на самолетах Boeing 787 Dreamliner и Airbus A350 композитные материалы используются в конструкции крыла, центроплана, фюзеляжа и хвостовой части.



Рисунок 39 — Boeing 787 Dreamliner

Композитные материалы также широко используются в производстве российских самолетов. Доля использования композитов в российском самолете MC-21 разработки корпорации «Иркут» составляет порядка 35–37%.



Рисунок 40 — Самолет MC-21

В самолете Sukhoi Superjet 100 из композитов изготовлены элементы крыла, рулевые поверхности, створки шасси и обтекатели. Ожидается, что широкое исполь-

зование композитных материалов позволит:

- уменьшить вес планера на 15%;
- повысить топливную экономичность;
- увеличить ресурс;
- снижение эксплуатационных расходов до 10% и затрат на техническое обслуживание до 30%, поскольку требуется меньшее количество проверок конструкции за счет более высокой устойчивости к коррозии и более длительного срока службы композитов по сравнению с металлами;
- уменьшение количества деталей в конструкции и, как следствие, снижение трудоемкости и затрат на сборку.[12]

### Ракетостроение

Существующие на сегодняшний день жесткие требования рынка космических запусков имеют строго определенную тенденцию к увеличению массы и габаритов выводимого на орбиту полезного груза (ПГ), что инициирует увеличение грузоподъемности ракет космического назначения (РКН) за счет создания новых и модернизации существующих носителей. Поиск эффективных путей снижения массы агрегатов ракетно-космической техники (РКТ), особенно в последние два десятилетия, привел к постоянно нарастающей тенденции использования в них полимерных композиционных материалов (ПКМ) с непрерывно возрастающим объемом и уровнем ответственности изделий. В современных твердотопливных ракетах доля ПКМ может составлять порядка 75-80% от общей мас-

сы конструкции без учета топлива, в крупногабаритных ракетных двигателях твердого топлива — 85-90%, в носителях с жидкостным ракетным двигателем — 25-30%. Практически до начала 80 — 90-х годов прошлого столетия как в отечественных, так и в зарубежных источниках информации содержание и объемы применения ПКМ в РКТ сохранялись под грифом секретности различного уровня.

ПКМ широко применяются в силовых элементах — головные обтекатели, переходные отсеки, адаптеры полезного груза, корпуса ракетных двигателей — в термонапряженных и эрозионно стойких элементах — камеры сгорания, сопла, турбонасосные агрегаты — и для тепловой защиты. При этом основными КСС для силовых элементов РКН являются сэндвичевые конструкции с различными типами заполнителя и сетчатые — изогридные и анизогридные.

### В конструкциях РКТ ПКМ применяются

в различных агрегатах:

#### 1. Силовые элементы, для которых преобладающее значение имеют прочностные и упругие характеристики композита:

- головные обтекатели (ГО);
- корпуса ракетных двигателей;
- переходные отсеки;
- адаптеры полезного груза;
- топливные баки;
- баллоны высокого давления.

#### 2. Термонапряженные и эрозионно стойкие элементы:

- камеры сгорания;
- сопла;
- турбонасосные агрегаты;
- газоводы.

#### 3. Элементы конструкции, предназначенные для тепловой защиты:

- теплообменники;
- теплозащитные и теплоизоляционные покрытия.

Ниже представлена номенклатура типовых композитных агрегатов РКН и применяемых для них конструктивно-силовых схем (КСС).

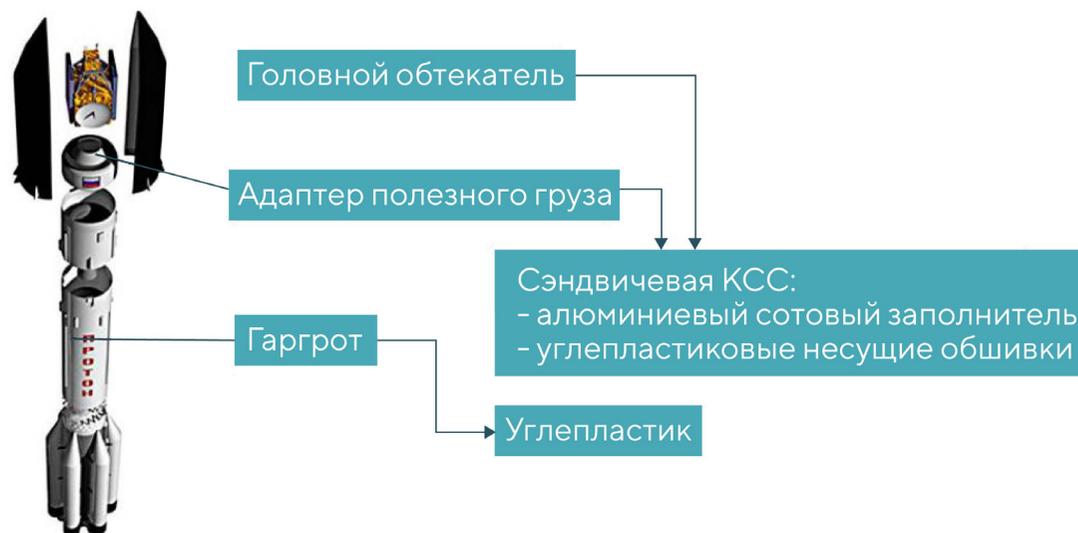


Рисунок 41 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Протон-М»

Из углепластика выполнены локальные обтекатели, приборные рамы, воздуховоды. В серийно производимых конструкциях РКН «Протон-М» и «Рокот» доля углепластика в силовом каркасе составляет от 20 до 80%, что обеспечивает снижение массы от 16 до 33%. Кроме того, применение ПКМ приводит к увеличению жесткости конструкции на 15%. На РКН «Рокот» ГО выполнен в виде углепластиковой оболочки интегрального типа, полученной методом совмещенного формования, что обеспечило дополнительное снижение массы на 14% по сравнению со сборным углепластиковым ГО. Для увеличения энергомассовых характеристик предшествующей модификации «Протон» был предпринят ряд мероприятий, в том числе и по снижению массы конструкции. В числе элементов, под-

вергшихся существенному облегчению, – переходная система, верхняя и нижняя проставки второй ступени. Эти составляющие РКН стали изготавливать из углепластика по сетчатой (изогридной и анизогридной) КСС, что позволило получить максимальную весовую отдачу. Так, верхний и нижний переходные отсеки второй ступени РКН «Протон-М» были представлены из системы ребер из углепластика и обшивки из органо-пластика. При этом экономия массы сетчатого верхнего отсека по отношению к алюминиевому стрингерному прототипу составила 20%, а нижнего отсека – 38%. Высокая весовая и экономическая эффективность сетчатых конструкций позволила использовать их также в качестве переходных отсеков, несущих баков и ГО РКН «Протон-М». Существенное повышение мас-

совой эффективности РКН «Протон-М» обеспечило также применение сетчатого адаптера, предназначенного для обеспечения механического интерфейса между РКН и космическим аппаратом. Применение композитных сетчатых отсеков в конструкции РКН «Протон-М», кроме существенного снижения массы ракеты, дало значительный экономический эффект. Так, масса сетчатого адаптера на 60% меньше массы конструкции из алюминиевого сплава, а его стоимость на 30% меньше.



Рисунок 42 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Delta II» и «Delta IV»

В РКН «Pegasus» и «Minotaur IV» ГО и адаптер ПГ выполнены в виде сэндвичевой конструкции, состоящей из алюминиевого сотового заполнителя и углепластиковых несущих обшивок.

Для РКН «Зенит-3SL» фирмой The Boeing Company из ПКМ выполнены такие элементы, как ГО, переходник между адаптером ПГ и адаптером РКН (сэндвичевой КСС с алюминиевым сотовым заполнителем и углепластиковыми несущими обшивками). Данный тип РКН имеет также сопловые насадки радиационного охлаждения двигателя 11Д58М из углерод-углеродных композиционных материалов. [13]

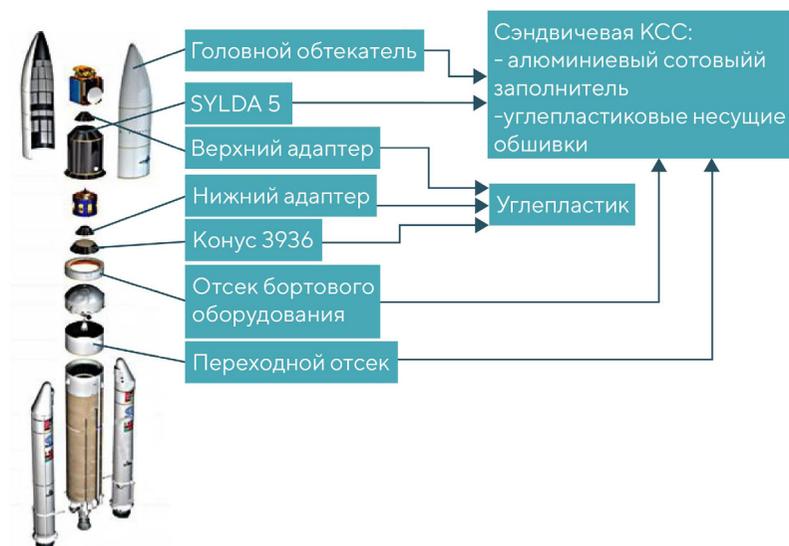


Рисунок 43 – Номенклатура типовых композитных агрегатов РКН «Ariane 5»

### Судостроение

Внедрение полимерных и композиционных материалов является одним из приоритетов инновационного развития судостроения. Для изготовления корпусных конструкций (обшивок корпусов, надстроек, палуб, переборок, конструктивных связей, крыши и т.д.) внедрены и широко применяются полимерные композиционные материалы (ПКМ) на основе армирующих материалов различной химической природы и полимерных матриц в виде реактопластов – полиэфирных и винилэфирных смол.

Опыт использования таких материалов подтвердил ряд их преимуществ перед сталью и алюминиевыми сплавами: низкий вес конструкций при высокой удельной прочности, коррозионная стойкость, низкая теплопроводность, возможность достижения в одном материале полифункциональных свойств (радиопоглощение, звукопрозрачность, вибродемпфирование). Но до сих пор актуален недостаток, свойственный полимерам, – их горючесть. Например, такой традиционный корпусный конструкционный материал, как стеклопластик на основе импортных или отечественных бромированных винилэфирных смол, допущенный к применению в судостроении Межведомственной комиссией по неметаллическим материалам и применяемый при строительстве судов, является горючим трудновоспламеняемым материалом с медленным распространением пламени по поверхности.

В соответствии с правилами части XVI Российского морского регистра судоходства (РМРС) ПКМ, применяемые в корпусных конструкциях, должны обладать такими свойствами, как негорючесть, а также не представлять опасность в отношении выделения токсичных или взрывоопасных продуктов при повышенных температурах. Требования к пожароопасным свойствам определяются в зависимости от типа судна и положений правил РМРС, на которые был одобрен проект судна.

В отечественном судостроении внедрение композитов, а именно стеклопластика, началось более 40 лет тому назад с постройки в 1966 г. первого в мире тральщика «Изумруд» (пр. 1252) водоизмещением 320 т. В период с 60-х до 80-х годов прошлого века было построено из стеклопластика более 100 противоминных кораблей водоизмещением от 60 до 320 т. Сегодня из ПКМ в отечественном судостроении серийно изготавливаются надстройки и амортизированные фундаментные рамы под главные двигатели кораблей, обтекатели ГАС надводных кораблей и подводных лодок, виброизолирующие соединительные муфты и другие изделия судового оборудования и систем. Строится с применением ПКМ значительное количество малых плавсредств — спасательных шлюпок, прогулочных и спортивных лодок, рыболовецких баркасов, катеров различного назначения и т.д. Идет серийное строительство противоминного корабля водоизмещением 790 т с корпусом и надстройкой, полностью изготовленными из композитов.

Помимо корпусных конструкций судов, ПКМ применяются в ограждении выдвижных устройств, стабилизаторах и перьях рулей подводных лодок, в прочных корпусах подводных аппаратов, в гребных валах и винтах, трубопроводах.

Также перспективными и востребованными при проектировании современных объектов морской техники будут материалы с сочетанием противоречивых требований по массе, прочности, заметности по физическим полям, функциональным свойствам. Традиционные материалы близки к исчерпанию возможностей модифицировать их свойства. Решением является совмещение армирующих материалов с различными свойствами в одном пакете, что позволит получить гибридный материал, обладающий полифункциональным комплексом свойств.

**Следующим шагом в развитии композитов следует ожидать создание интеллектуальных полимерных композиционных материалов, развитие которых будет проходить в три этапа:**

- создание интеллектуальных полимерных композиционных материалов первого типа с системой встроенного контроля деформации, температуры, давления и акустической эмиссии с интегрированными волоконно-оптическими сенсорами на основе волоконных брегговских решеток (или иных методик);
- создание интеллектуальных ПКМ второго типа, способных оценивать свое состояние по поступающей от встроенных датчиков информации;
- создание интеллектуальных ПКМ третьего типа — са-

мовосстанавливающихся, т. е. способных на основании оценки своего состояния (типа и формы дефекта) возвращаться к исходным параметрам.

Создание функциональных ПКМ основано на использовании возможности широкого варьирования конечных свойств поверхности и внутренней структуры за счет различных сочетаний наполнителей, армирующих и связующих материалов.[14]

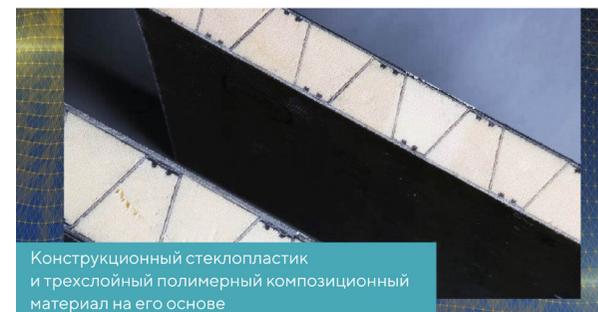


Рисунок 44 – Конструкционный стеклопластик и трехслойный полимерный композиционный материал на его основе

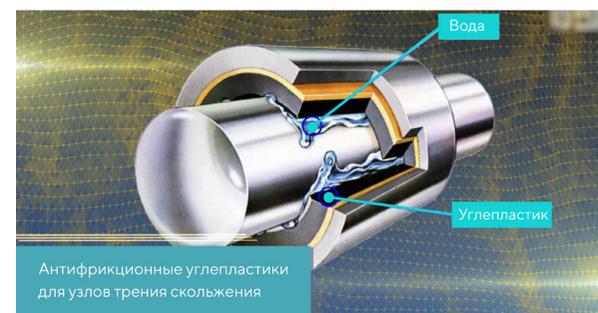


Рисунок 45 – Антифрикционные углепластики для узлов трения скольжения

### Вагоностроение

Эффективность использования грузовых вагонов напрямую зависит от материалоемкости конструкции грузового подвижного состава, его долговечности, затрат на производство и эксплуатационные расходы. Кроме того, основные параметры грузовых вагонов из традиционных материалов, такие как снаряженная масса, грузоподъемность, долговечность и т. д., практически не имеют резерва для улучшения. Ограниченное улучшение параметров стало одним из факторов возрастающей актуальности вопроса разработки и внедрения инноваций в жезнодорожной промышленности, в частности использования в производстве композитных материалов.

В настоящее время основными материалами, используемыми в жезнодорожной промышленности, являются углеродистые и низколегированные стали, а также алюминий. Углеродистые стали используются при изготовлении несущих элементов вагонных конструкций, низколегированные стали – при изготовлении сварных конструкций, а алюминий – при изготовлении элементов внутреннего оборудования. Наиболее распространенными композитными материалами в вагоностроении являются углепластики, стекло- и органопластики.

У них есть ряд преимуществ и недостатков перед традиционными материалами используемыми в данной отрасли. Сравнительные характеристики материалов представлены в таблице ниже.

Критерий	Сталь	Алюминий	Композитный материал (стеклопластик)
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	7800	2640–2800	1800–1900
Модуль упругости, ГПа	210	70–71	55
Предел прочности при растяжении, МПа	240	50–440	1700
Теплопроводность, Вт/К·м	17,5–58	140–190	0,3–0,5
Электропроводность, Ом·м	Проводник	Проводник	1:10 <sup>10</sup>
Коррозионная стойкость (внешняя среда)	Низкая	Высокая	Абсолютная
Стойкость к агрессивной среде	Низкая	Низкая	Высокая
Гигроскопичность, %	Нет	Нет	0,5
Температура эксплуатации, °С	от -60 до +3000	от -70 до +210	от -60 до +600
Долговечность, лет	Около 40	Около 50	Более 80
Эксплуатационные затраты	Требуются регламентные работы не реже 1–2 раза в год	Требуются регламентные работы не реже 1 раза в год	Не требуются

Таблица 1 – Сравнительная характеристика стали, алюминия и композитного материала

По отношению к стали и алюминию композитные материалы являются более легкими, но при этом не уступают им по прочностным характеристикам. Кроме того, композиционные материалы обладают низкой теплопроводностью, биологической и химической стойкостью, обладают диэлектрическими свойствами и выдерживают температуру до 600 °С. Однако стоимость композитов в несколько раз превышает стоимость стали и алюминия, что объясняется сложным технологическим процессом производства композитов и необходимостью использования дорогостоящего оборудования и сырья.

**Большие перспективы использования композиционных материалов в вагоностроении обусловлены следующими факторами:**

- высокая стойкость композитов к химическому воздействию транспортируемых грузов и окружающей среды;
- совместимость с химической и пищевой продукцией;
- способность сохранять механические характеристики в течение всего срока службы при воздействии высоких и низких температур;
- нет необходимости использовать дорогие покрытия;
- снижение частоты ремонтов.

Все эти факторы влияют на снижение стоимости жизненного цикла инновационного продукта.

Использование композитных материалов позволяет снизить массу вагона. Снижение собственной массы, в свою очередь, помогает снизить эксплуатационные

расходы, связанные с перемещением тары вагона и увеличением грузоподъемности вагона в пределах допустимой нагрузки на ось.

Можно сказать, что производство деталей железнодорожных вагонов из композитов менее трудоемко по сравнению с производством таких же деталей из металлов. Формование композитной детали обычно занимает больше времени, чем штамповка стального листа, но обработка металла включает в себя ряд дополнительных операций, таких как, например сварка и зачистка, которые не типичны для неметаллических материалов.

Высокая стоимость композитного материала компенсируется эффективностью его использования, которая превосходит эффективность использования металлов в конструкции вагона. Хотя внедрение деталей из композитных материалов увеличивает начальную стоимость вагона, приобретаемые деталями свойства гарантируют бесперебойную работу на протяжении всего жизненного цикла изделия.[15]



Рисунок 46 – Композитный вагон

### **Автомобилестроение**

Композиционные материалы — это в первую очередь изделия из углеродного волокна, которые уже много лет используются в автомобильной промышленности, и их использование растет с каждым годом. Важнейшие преимущества углеродного волокна — низкая плотность и высокая прочность. Использование композитов в автомобилестроении позволяет снизить вес автомобиля на 20–25%, что значительно увеличивает КПД двигателя и снижает расход топлива.

Первое, что конструкторы позаимствовали у легкомоторной авиации, — это возможность формировать композитные панели кузова практически любых форм и размеров.

Снижение веса вдвое принесло значительные выгоды, но за это пришлось заплатить значительным увеличением затрат и усложнением технологии производства. Корпус из композитов на основе стекловолокна или углеродного волокна приходилось формировать

практически вручную, при постоянном и непрерывном контроле всех технологических операций. Дефект неприемлем, каждая панель являлась штучным товаром, после операции формования уже ничего не подлежало восстановлению или ремонту. Сборка на конвейере даже самых элитных моделей была основой каждого автозавода, иначе производственные затраты не покрывались выручкой от продажи автомобилей. Даже такие неоспоримые преимущества, как экономия топлива, улучшение динамических свойств автомобилей, антикоррозийная гарантия на 50 лет, были недостаточно привлекательны в глазах покупателей, чтобы они заплатили вдвое дороже за новинку. Анализ и испытания композитных несущих элементов, армированных стекловолокном, неожиданно показали, что композиты значительно уступают металлу как несущие элементы конструкции, рассчитанные на поглощение основной энергии удара — минимум вдвое. Таким образом, внедрение пластмасс и композитов в конструкцию автомобилей не принесло ожидаемого эффекта и оставило основные доминирующие позиции качественной стали и легким сплавам.

Возврат разработчиков к использованию композитов был замечен специалистами совсем недавно и совпал с появлением на рынке гибридных автомобилей и «чистых» электромобилей. Электропривод в большинстве перспективных моделей подразумевает наличие значительной дополнительной массы электрических батарей или топливных элементов. Ресурсы, пробег и динамика электромобилей тесно связаны с массой

автомобиля. При этом модели, предназначенные для эксплуатации в городских условиях, изготавливаются с высоким центром тяжести и небольшим расстоянием между осями. Небольшие размеры автомобилей позволяют с легкостью найти место для парковки и протиснуться в пробках. Высокий центр тяжести опрокидывает автомобиль. Композитные материалы уменьшают вес конструкции почти на 30%, а тяжелые батареи, размещенные в самом нижнем положении, смещают положение центра тяжести машины для обеспечения гарантированной безопасности. В этом случае использование композиционных материалов дает ощутимый экономический эффект.

Изменились и технологии производства композитных деталей. В настоящее время их производят, как и металлические детали на роботизированных линиях. Для упрощения сборки металлические крепежи запрессовываются в места соединения с другими деталями во время сборки. Этот метод позволяет использовать сварные, болтовые и клепанные соединения. Все колебания и знакопеременные нагрузки такие изделия, в том числе металлические, воспринимают без риска возникновения усталостных трещин и расслоения композитных панелей.

Наблюдая за техническим прогрессом в разработке и применении композитных материалов, можно с уверенностью сказать, что в ближайшем будущем появятся серийные автомобили с полностью композитным кузовом и множеством узлов и агрегатов.

Использование деталей и узлов на основе полимер-

ных КМ в автомобильной промышленности с каждым годом увеличивается. В настоящее время в структуре сырья для автозапчастей доля полимеров, в % от стоимости среднего автомобиля занимает третье место после металла.

Использование композитов для производства технических изделий обеспечивает: уменьшение веса конструкции при ее высокой прочности; высокий уровень безопасности с точки зрения электрической износостойкости — трекинговое сопротивление и дуговое сопротивление; высокий уровень устойчивости к УФ-излучению; возможность использования красителей для создания цветовой гаммы продукции.

Использование ПКМ в автомобиле снижает его вес на 15–30%, а снижение веса на 100 кг снижает расход топлива на 0,5 литра на 100 км. Конечно, высокотехнологичные полимеры не более экономичны, чем сталь или алюминиевый сплав, а процесс формования полимерных деталей дольше, чем штамповка стального листа, но они не требуют защиты от коррозии.

Концерн Mercedes также использует углеродное волокно, из которого производятся детали, заменяющие стальные элементы. Из них изготавливают корпуса двигателей и опорную систему балочной конструкции. В обновленной SL65 Black Series благодаря нововведениям масса машины уменьшилась на ~170 кг, что позволило повысить эффективность всей машины.

Пружины, изготовленные из высоко технологичных полимерных композитов, в отличие от стальных пружин, не вызывают коррозии и нейтральны по отноше-

нию к реагентам и химическим веществам, используемым в автомойках. Кроме того, такие пружины более экономичны в производстве, так как процесс менее энергоемкий. Для их производства требуются не большие производственные мощности, а небольшие цеха.[16]



Рисунок 47 – Элементы кузова автомобиля, выполненные из композита

### Строительство

Использование полимерных композитных материалов в строительстве позволяет снизить массу строительных конструкций, повысить коррозионную стойкость и устойчивость к неблагоприятным климатическим факторам, увеличить время между ремонтами, проводить ремонт и усиление конструкций с минимальными затратами ресурсов и времени.

#### Основные области применения полимерных композитов:

- армирование и гибкие соединения;
- шпунтовые сваи и ограждения;

- сэндвич-элементы, оконные и дверные профили;
- элементы мостовых конструкций (пешеходные мосты, переходы, несущие элементы, элементы ограждений, перекрытия, подпорки);
- системы внешнего армирования.

За рубежом широкое внедрение арматуры из композитных материалов при строительстве бетонных конструкций началось в 80-х годах прошлого века, особенно при строительстве мостов и дорог. Научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по разработке и применению композитной арматуры начались в СССР в 1950-х годах. В 1963 году в Полоцке был введен в эксплуатацию цех по опытному производству стеклопластиковой арматуры, а в 1976 году НИИЖБ и ИСиА разработали «Рекомендации по расчету конструкций со стеклопластиковой арматурой». Композитная арматура на основе непрерывного волокнистого наполнителя и полимерной матрицы имеет ряд существенных преимуществ перед стальной арматурой, в том числе с антикоррозийным покрытием, включая низкую плотность (в 4 раза легче стали), высокую коррозионную стойкость, низкую теплопроводность и диэлектрические свойства, более высокую прочность. Низкая плотность и высокая устойчивость к коррозии и химическому воздействию особенно важны при строительстве дорог, мостов, теплотрасс, прибрежных и портовых сооружений. Стекловолокно, непрерывное базальтовое волокно и углеродное волокно могут использоваться в качестве

армирующего наполнителя композитного материала, используемого для производства строительной арматуры. Наиболее распространенный метод изготовления арматуры из стеклопластика или базальтопластика — это пултрузия. В следующих таблицах показаны свойства отечественной и зарубежной композитной арматуры.

Характеристика	Значения характеристики для композитной арматуры			
	из стеклопластика			из углепластика
	ТУ 2296-001-20994511-2006	ТУ 5714-007-13101102-2009	ТУ 5769-001-09102892-2012	ТУ 1916-001-60513556-2010
Предел прочности при растяжении, МПа	11001	000	1200	1600
Модель упругости при растяжении, ГПа	50	45	55	130

Таблица 2 – Характеристики российской композитной арматуры

Характеристика	Значения характеристики для композитной арматуры			
	из стеклопластика		из углепластика	
	Glass V-rod HM	Aslan 100A	slan 200C	arbon V-rod
Предел прочности при растяжении, МПа	1000-1300	413-896	2068-2241	1350-1765
Модель упругости при растяжении, ГПа	62-664	61	24	127-144
Относительное удлинение при разрыве, %	1,7-2,60	,9-1,9	1,67-1,81	1,2-1,3

Таблица 3 – Характеристики зарубежной композитной арматуры

В настоящее время можно выделить два основных направления развития технологий изготовления композитной арматуры за рубежом: использование двухслойной арматуры с композитной сердцевиной, армированной непрерывными волокнами, и внешней оболочки, усиленной рубленными волокнами, а также разработка технологий изготовления арматуры на основе термопластичной полимерной матрицы.

Основными направлениями развития отечественного производства композитной арматуры являются использование непрерывного базальтового волокна в качестве армирующего наполнителя и модификация составов связующих и технологического оборудования с целью улучшения свойств и повышения производительности.

Благодаря своей низкой плотности и высокой устойчивости к негативным воздействиям окружающей среды, полимерные композиты обеспечивают значительные преимущества по сравнению с материалами, традиционно используемыми при строительстве инфраструктурных объектов, включая строительство мостов. Мосты, эстакады и путепроводы – сложные инженерные сооружения с высокими требованиями к надежности и долговечности. В Северной Америке и Европе ведутся активные работы по использованию полимерных композитов в мостостроении. Мосты с использованием элементов полимерных композитов строятся более 15 лет и объем строительства этих мостов увеличивается. Развивается и класс мостов – от

первых экспериментальных пешеходных переходов до автомобильных мостов длиной до 20 м. В зарубежных странах основными областями применения полимерных композитов в мостостроении являются композитная арматура и мостовые настилы, а также и пешеходные мосты. Ведутся работы по проектированию и созданию вантовых троссов из полимерных композитных материалов, а также быстровозводимых мостовых конструкций с использованием элементов несущих конструкций из ПКМ. Мостовые настилы, применяемые за рубежом, разделяют по способу установки: на опорах моста или на продольных балках; а также по структуре: многоячеистые панели или сэндвич-панели, состоящие из композитных плит и вспененного материала между ними. Пултрузия и намотка используются при производстве настилов, а технология RTM используется для производства сэндвич-панелей. Стекловолокно используется в качестве армирующего волокна, а полиэфирные, эпоксидные и винилэфирные смолы используются в качестве полимерной матрицы. Для соединения конструктивных элементов мостового настила используется склейка и/или механическая фиксация. Основными способами крепления композитного настила к опорным элементам и между собой являются механический метод и склейка. Традиционный метод механической фиксации – надежный и проверенный метод, однако необходимость сверления отверстий для крепления элементов снижает прочность и увеличивает чувствительность конструкции к факторам окружающей сре-

ды. Способ крепления клеем более прогрессивный, так как обеспечивает прочное и быстрое соединение без нарушения структуры материала, сверление отверстий под крепеж не требуется. Однако он имеет ряд недостатков, таких как сложность соблюдения требований к подготовке поверхности и условий окружающей среды при склеивании во время работы на объекте, отсутствие надежных неразрушающих методов контроля качества склейки на объекте на данный момент. Для повышения надежности и прочности мостового настила, а также снижения их стоимости ведутся работы по созданию гибридных конструкций с бетонными или железобетонными элементами.

Помимо преимуществ композитных мостовых настилов, таких как низкая плотность, позволяющая снизить нагрузку на опорную конструкцию и расход материалов, простота укладки, поскольку требуется оборудование с меньшей грузоподъемностью, технологичность и высокая устойчивость к коррозии, что позволяет снизить эксплуатационные расходы, имеет ряд недостатков. Среди недостатков – высокая стоимость композитного настила; трудности разработки эффективных конструкций для крепления панели к панели и панели к продольной балке; отсутствие исчерпывающих стандартов и рекомендаций по проектированию; недостаточно данных о прочностных характеристиках при совместном действии механических нагрузок и факторов окружающей среды. [17]



Рисунок 48 – Композитная арматура

### Производство режущего инструмента

Спеченные твердые сплавы широко применяются для обработки материалов резанием, для оснащения горного инструмента, быстроизнашивающихся деталей машин, узлов штампов, инструмента для волочения, калибровки, прессования и так далее. В качестве примера самых распространенных изделий из твердых сплавов можно привести резцы и буровые головки. Инструмент, полностью изготовленный из твердого сплава, очень дорог, поэтому из него изготавливают лишь режущую или изнашиваемую часть.[32]

Сплавы вольфрамовой группы ( $WC-Co$ ) обладают теплостойкостью до  $800\text{ }^{\circ}C$ , наибольшей прочностью, но меньшей твердостью, чем другие твердые сплавы. Их применяют при изготовлении режущего инструмента для обработки сталей, чугунов, цветных сплавов и неметаллических материалов. Для вольфрамовой группы сталей характерна повышенная стойкость к износу и сопротивляемость ударам, поэтому их широ-

ко применяют для производства горного инструмента, фильер, пуансонов, штампов, матриц и других.

Сплавы титановольфрамовой группы ( $WC-TiC-Co$ ) обладают теплостойкостью до  $900-1000\text{ }^{\circ}C$  и более высокой твердостью. При температуре спекания карбид вольфрама растворяется в карбиде титана, образуя раствор  $(Ti, W)C$ , превышающий по твердости  $WC$ . Соотношение в шихте  $WC$  и  $TiC$  определяет структуру карбидной фазы. Так, в сплаве Т30К4 образуется одна карбидная фаза — раствор  $(Ti, W)C$ , который обеспечивает максимальную твердость сплава ( $HRA\ 92$ ) и одновременно пониженную прочность. В других сплавах титановольфрамовой группы количество  $WC$  превышает растворимость в  $TiC$ , и карбиды вольфрама присутствуют в виде избыточных частиц. Основная сфера применения таких материалов — высокоскоростная обработка чугунов и сталей.

Группа титанотанталовольфрамовых сплавов ( $WC-TiC-TaC-Co$ ) имеет структуру карбидной основы в виде твердого раствора  $(Ti, Ta, W)C$ , и избыток  $WC$ . Для твердых сплавов этой группы характерна более высокая прочность и сопротивляемость выкрашиванию и вибрациям. Поэтому их используют при наиболее тяжелых условиях резания: при работе с труднообрабатываемыми сплавами и сталями, при черновой обработке стальных поковок и отливок.[31]



Рисунок 49 – Пластина из твердого сплава

### УМНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

#### Применение умных материалов

##### Углеродные нанотрубки

Благодаря своим уникальным свойствам углеродные нанотрубки (УНТ) используются в промышленности в качестве ключевых компонентов многих электронных устройств, микроустройств и т. д. Чтобы превратить эти устройства в коммерческие продукты, сначала необходим практичный и недорогой метод выращивания УНТ. Относительно низкие температуры процесса и возможность нанесения катализаторов в соответствии с заданным шаблоном непосредственно на подложку делают метод каталитического химического осаждения из паровой фазы наиболее предпочтительным методом синтеза углеродных нанотрубок. Еще одна проблема после создания технологии синтеза углеродных нанотрубок — применение и использование выдающихся свойств нанотрубок.

Ожидается, что легкие и прочные композиты для ав-

томобильной и аэрокосмической отраслей займут первое место с точки зрения потребления. Дополнительным рынком сбыта станут УНТ и композиционные материалы на их основе в качестве аккумуляторов на водороде; материалы для поглощения радиолокационного излучения; электромагнитные экраны для электронных систем; сверхёмкости в электрических батареях; химические и биологические сенсоры; излучатели для плоских дисплеев, осветительных ламп и рентгеновских трубок; наноэлектронные интегральные схемы; кантилеверы для атомно-силовых микроскопов; материалы для спортивного инвентаря; технический текстиль.

#### **Эмиссия электронов**

Подобно кремнию, который стал материалом №1 в компьютерной индустрии в XX веке, УНТ, вероятно, станут таким материалом в XXI веке, который позволит сделать следующий шаг к созданию новой элементной базы для электроники.

УНТ — лучшие эмиттеры электронов из всех известных материалов. Все это связано с высокой электропроводностью и невероятно малым диаметром нанотрубок. Чем меньше радиус кривизны конца нанотрубки, тем больше концентрация на нём электрического поля, что приводит к повышенной эмиссии электронов. Острота конца УНТ также означает, что при приложении низкого напряжения возможны высокая эмиссия, что важно при производстве электрических устройств с низким потреблением энергии. Параллельно с чрезвычайной стабильностью тока эмиссии наблюдается

его высокая плотность, и прямым воплощением этой особенности углеродных нанотрубок являются катодлюминесцентные источники света и, следовательно, гибкие экраны с очень большой площадью и эмиттер электронов на основе УНТ. Каждый пиксель такого экрана представляет собой миниатюрную электронно-лучевую трубку, установленную на полимерной основе.

Другие применения этих свойств углеродных нанотрубок — это кантилеверы для электронных микроскопов, низковольтные источники света с холодным катодом. Уникальным свойством углеродных нанотрубок является выбор очень узкой длины волны излучения или детектирования света и возможность очень точной регулировки путем изменения структуры УНТ. Есть исследования по использованию углеродных нанотрубок в качестве чувствительного элемента болометра и для создания оптоэлектронной памяти.

#### **Усиленные и проводящие ток пластики с интегрированными УНТ**

Одной из целей появления в мире пластика была замена металла. Однако по большей части пластмассы являются хорошими изоляторами и не проводят электричество, и для многих областей применения это требуется. Решением этого противоречия являются токопроводящие наполнители. Также известно, что чем выше коэффициент пропорциональности проводящих наполнителей, тем лучше. Благодаря особому соотношению длины к диаметру углеродных нанотрубок они являются идеальными наполнителями для

производства проводящих ток пластиков. УНТ уже нашли свое применение в создании защитных композитов от электромагнитных интерференций, защитных оболочек, антистатических материалов, прозрачных проводящих покрытий и материалов, поглощающих радиолокационное излучение для военного применения. УНТ широко используются в автомобильной промышленности США с 1990-х годов. Композит с проводящими УНТ, покрывающий кузов автомобиля, устраняет необходимость в грунтовке при окраске электростатическим распылением. Он также увеличивает стойкость краски и снижает воздействие на окружающую среду летучих органических соединений, используемых в обычных лакокрасочных покрытиях. Проводящий полимер в системе подачи топлива исключает риск повреждения искрами статического электричества. Включение углеродных нанотрубок в композитный материал для создания крыльев и других частей летательных аппаратов, которые подвергаются высоким нагрузкам, позволяет сразу находить микротрещины и другие типы нежелательных изменений в материале композита, например, расслоение, путем измерения электрического сопротивления композитного материала сразу в нескольких точках. Данный метод позволяет не только определить положение микротрещин, но и отремонтировать их, то есть восстановить материал, просто подавая электрический ток к нужным точкам. Специальный материал, содержащийся в композите, плавится и восстанавливает его структуру и прочность.

### **УНТ для хранения энергии**

Некоторые характеристики УНТ требуются в материалах используемых как электроды в батареях или конденсаторах. Большая поверхностная площадь, высокая электропроводность и что особенно важно линейная геометрия углеродных нанотрубок делает их поверхность очень доступной для электролита. Уже сегодня в литийионных батареях используются электроды механически стабилизированные внедрением многостенных углеродных нанотрубок. В дополнение, УНТ являются прекрасным материалом для создания электродов в суперконденсаторах.

Ячейки топливных элементов — еще одна область в которой применение УНТ стремительно развивается. Нанотрубки также материал номер один для создания сверхэффективных катализаторов, в частности для кислородного электрода в топливных ячейках. Углеродные нанотрубки благодаря их механическим свойствам используются для создания роторов сверхскоростных маховиковнакопителей энергии. Такие маховикинакопители энергии в ближайшее время могут прийти на смену аккумуляторных батарей в автомобилях, они будут накапливать энергию торможения и отдавать ее при начальном разгоне автомобиля, и будут использоваться для накопленияотдачи избыточной энергии, которую вырабатывают электростанции, в часы наименьшей нагрузки.

### **Проводящие клеящие/связывающие компоненты и соединители**

Проводящие углеродные нанотрубки хороши для соз-

дания соединительных материалов, таких как проводящий клей, изоляционные и адгезионные смеси, коаксиальные кабели и другие соединители.

За последние несколько лет в передовых исследовательских центрах не остановилась разработка электронных схем и компонентов из мельчайших элементов — молекул. В любой электронной схеме, особенно в наноразмерной, связи между ключевыми компонентами становятся особенно важными. Геометрия этих межсоединений, их электропроводность и возможность их точного вывода делают УНТ достойными кандидатами для таких соединений в молекулярной электронике. Кроме того, УНТ показали, что сами могут служить переключающими элементами, так называемыми нанотранзисторами. Примером использования УНТ в качестве элементов памяти для персональных компьютеров является разработка американской компании Nantero (США). Данная компания разработала прототипы энергонезависимых ячеек памяти, которые будут работать при очень низком напряжении и иметь миллионы циклов при очень высоких скоростях переключения. Невидимые глазу электрические схемы на основе прозрачных транзисторов, изготовленные на основе углеродных нанотрубок, найдут применение в военной и промышленной сфере. Эти устройства создаются на гибких пластиковых подложках путем послойного выращивания матрицы одностенных нанотрубок в слегка модифицированном процессе CVD. Были разработаны первые прототипы таких прозрачных схем, которые заменят существующие прозрач-

ные электроды на основе оксидов Индий-Олово и будут применяться в первую очередь для создания сенсорных дисплеев и для производства элементов солнечных батарей.

### **Термоматериалы**

Высокая анизотропная теплопроводность углеродных нанотрубок позволяет использовать это свойство в приложениях, где требуется передача тепла от одной точки к другой. Например, в электронике в качестве радиаторов для чипов. В последнее время появились композиты с нанотрубками, которые также показывают очень высокую теплопроводность.

### **Волокна и ткани с встроенными УНТ**

Никого больше не удивляют волокна, целиком полученные из УНТ. В США и других развитых странах есть компании, предлагающие коммерческие волокна из чистых углеродных нанотрубок или композитов на основе волокон из УНТ. Такие сверхпрочные волокна можно применять во многих отраслях промышленности, например в оборонной промышленности, для создания бронезилетов, брони, кабелей.

### **УНТ как основание для катализаторов**

УНТ имеют исключительно большую площадь поверхности. Например, в одностенных углеродных нанотрубках каждый атом представляет собой не одну, а две поверхности — снаружи и внутри нанотрубки. Такая обширная поверхность в сочетании с возможностью добавления к ней любых химических веществ дает уникальное применение углеродных нанотрубок в качестве основы для удерживания катализатора.

Также возможно использовать высокую электрическую проводимость нанотрубок для создания новых катализаторов.

#### **Керамика с интегрированными УНТ**

Керамические материалы, усиленные за счет введения УНТ являются намного более прочными, проводят электричество и могут проводить или не проводить тепло, в зависимости от ориентации нанотрубок внутри керамики. Эти керамические материалы выдерживают высокие термические нагрузки и обладают высокой химической стойкостью, что делает их пригодными, например, для покрытия лопаток турбин или в качестве внешнего покрытия для космических спускаемых аппаратов. Композитная керамика, состоящая из оксида алюминия, 5-10% нанотрубок и 5% ниобия, в 5 раз более эффективна против растрескивания под нагрузкой, чем широко используемый оксид алюминия, имеет электропроводность в 7 раз больше, чем просто керамика с УНТ и проводит тепло в одном направлении — вдоль направления ориентации нанотрубок и служит хорошим барьером для нагрева в направлении, перпендикулярном ориентации УНТ в композитном материале.

#### **Биомедицинские применения УНТ**

Использование углеродных нанотрубок в биомедицине быстро растет. Большая часть человеческого тела состоит из углерода, что побуждает исследователей задуматься о биосовместимости углеродных нанотрубок с живой тканью человека. Были проведены исследования роста УНТ из живых клеток, что свиде-

тельствует об отсутствии токсического действия. Не происходит сращивания клеток с нанотрубками, что позволяет создавать хирургические протезы и имплантаты на основе УНТ. Нанотрубки также можно использовать для создания артериальных катетеров или трубок для предотвращения сужения артерий (стентов). Также было показано, как одна нить ДНК прикрепляется к углеродной нанотрубке, а затем вводится в живую клетку. Это можно использовать в генной терапии. Есть исследования по созданию искусственных мышц — микротоки пропускаются через тонкие листы нанотрубок, при этом наблюдается их сокращение и удлинение.

Исследователи из Массачусетского технологического института продемонстрировали использование углеродных нанотрубок в качестве сенсоров для определения воздействия лекарств на раковые клетки или для обнаружения присутствия веществ, повреждающих ДНК. Данный сенсор определяет наличие и расположение отдельных молекул веществ, которые вводятся в клетку. Каждая нанотрубка имеет прикрепленную ДНК, которая при введении в клетку захватывает молекулы агрессивного вещества. Такое присоединение изменяет интенсивность или длину волны флуоресценции УНТ в ближней инфракрасной области. Таким способом возможно распознать все молекулы вещества, попавшие в клетку.

Иное применение УНТ связано с их использованием в качестве носителей для доставки лекарств в нужное место в организме, хотя механизмы проникновения

нанотрубки в клетки до сих пор неясны.

#### **Фильтрация воды, воздуха и газообразных веществ с помощью УНТ**

Промышленные предприятия развитых стран давно используют специальные фильтры для воды и воздуха на основе углеродных нанотрубок. Было установлено, что данные фильтры не только улавливают очень мелкие частицы веществ, но также и убивают большинство бактерий. Фильтры для топлива, смазочных материалов и различных газообразных продуктов уже используются потребителями. Нет сомнений в том, что углеродные наноматериалы, особенно УНТ, могут быть использованы для защиты окружающей среды. Уникальные сорбционные свойства позволяют использовать их для фильтрации различных вредных примесей, например, тяжелых металлов (свинец, кадмий) и др. Было показано, что функционализация путем обработки нанотрубок кислотами увеличивает сорбцию ионов урана на порядок. Кроме того, обеспечивая требуемые поверхностные группы, а также выбрав матрицу для композита, можно создавать сорбенты с неограниченным количеством циклов сорбции/десорбции, которые обратимо сорбируют необходимые ионы при высоком показателе pH среды и десорбируют при низком pH. Таким образом, углеродные нанотрубки могут использоваться в атомной промышленности в качестве сорбентов (более эффективных, чем активированный уголь) и в качестве фильтров, а также для инкапсуляции и отверждения радиоактивных отходов.

### Другие сферы применения УНТ

Есть примеры использования УНТ в текстильной промышленности при создании тканей не боящихся загрязнений, усиленные теннисные ракетки и бейсбольные биты — это простые примеры использования УНТ при создании спортивных товаров. Широкое применение УНТ находят в упаковке, так как введение нанотрубок в материал упаковки позволяет уменьшить сопротивление упаковки проникновению атмосферы, что увеличивает срок хранения продуктов. Одна пивная компания в США профинансировала работы по созданию пластиковой упаковки с УНТ. В этой упаковке пиво остается холодным длительное время, чем в обычной. УНТ уже давно применяются при создании плоских дисплеев и ожидается появление коммерческих продуктов с прозрачными токопроводящими покрытиями на основе УНТ. Одностенные нанотрубки могут использоваться как миниатюрные датчики для обнаружения молекул в газовой среде или в растворах с ультра высокой чувствительностью при адсорбции на поверхности нанотрубки молекул ее электросопротивление может изменяться на 3 порядка в течение нескольких секунд. Такие нанодатчики могут использоваться для мониторинга окружающей среды, в военных, медицинских и биотехнологических применениях. Есть исследование, обнаружившее воспламенение листа с УНТ при попытке сфотографировать его с фотовспышкой — это свойство можно использовать при создании, например, новых запалов в военной промышленности.

Недавно китайские ученые обнародовали исследование по созданию плоских громкоговорителей из листов УНТ, простейшее коммерческое применение этого электроакустического эффекта состоит в замене пьезоэлектрических динамиков в поздравительных открытках.[18]

### Аэрогель

Аэрогель является крайне перспективным материалом, в последние годы нашедшим применение в различных областях науки и производства, начиная от текстильной промышленности или оборудования для пожарных, и заканчивая применением на большом адронном коллайдере или при проектировании различных космических аппаратов, как пилотируемых, так и автоматических.[39]

В настоящее время выделяют основные сегменты промышленности, в которых аэрогели нашли свое применение:

- термоизоляция, шумоизоляция;
- электроника;
- химия;
- медицина;
- военные технологии;
- энергетика;
- сенсоры и инструменты;
- космос;
- потребительские товары;
- биология;
- фармацевтика;
- охрана окружающей среды.

### Материалы с памятью формы

Применение эффекта памяти формы позволяет решать многие технические задачи:

- создание герметичных трубных узлов аналогично методу развальцовки (фланцевые соединения, самозатягивающиеся обоймы и муфты);
  - изготовление зажимных инструментов, захватов, толкателей;
  - проектирование «суперпружин» и аккумуляторов механической энергии, шаговых двигателей;
  - создание соединений из разнородных материалов (металл-неметалл) или в труднодоступных местах, когда применение сварки или пайки становится невозможным;
  - изготовление силовых элементов многоразового действия;
  - корпусная герметизация микросхем, гнезда для их присоединения;
  - производство регуляторов и датчиков температуры в различных приборах (пожарная сигнализация, предохранители, клапаны тепловых машин и другие).
- В медицинском материаловедении металлы с данными свойствами используются для изготовления таких технологических устройств, как:
- шаговые двигатели для вытяжения костей, выпрямления позвоночника;
  - фильтры для кровезаменителей;
  - приспособления для фиксации переломов;
  - ортопедические аппараты;
  - зажимы для вен и артерий;

- детали насосов для искусственного сердца или почки;
- стенты и эндопротезы для имплантации в кровеносных сосудах;
- ортодонтические дуги для коррекции зубного ряда. [41]

Примером использования таких материалов в промышленности являются роботы-манипуляторы. Термомеханические приводы могут эффективно использоваться в робототехнике. Адаптивные захватные устройства предназначены для робототехнических систем и технологического оборудования и способны длительное время удерживать объекты различной формы и разной плотности, например, тяжелые стальные или хрупкие стеклянные объекты неопределенной формы. Такие устройства, используемые в качестве движителей со сплавами с ЭПФ, не требуют использования электромеханических, гидравлических или пневматических силовых приводов, просты по конструкции, эффективны при работе в экстремальных условиях, например, в зонах повышенной радиации, в вакууме, в агрессивных средах. [42]

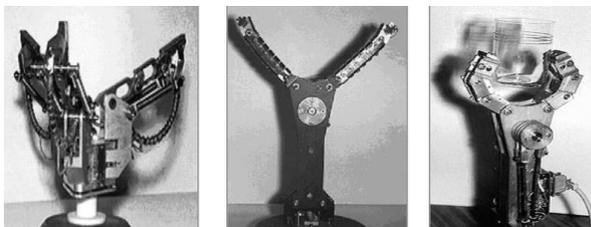


Рисунок 50 — Примеры робототехнических системы с адаптивными захватными устройствами на основе сплавов с ЭПФ

#### **Высокотемпературные сверхпроводники**

Применение технологий сверхпроводимости играет значительную роль при создании электронной компонентной базы:

- компоненты СВЧ-диапазона (генераторные приборы, пассивные элементы, резонаторы, фильтры, линии задержки);
- транзисторы;
- чувствительные электронные приборы (магнитометры, ВТСП-боллометры). [52]

Электроэнергетика — сверхбыстрые токоограничивающие устройства на основе ВТСП и компактные сверхпроводниковые кабельные линии уже начинают внедряться в сетевой инфраструктуре развитых городов и крупных промышленных объектов.

#### **Стекло с редкоземельными металлами**

Редкоземельные элементы используют в различных отраслях техники: в радиоэлектронике, приборостроении, атомной технике, машиностроении, химической промышленности, в металлургии и др. Широко при-

меняют La, Ce, Nd, Pr в стекольной промышленности в виде оксидов и других соединений. Эти элементы повышают светопрозрачность стекла. Редкоземельные элементы входят в состав стёкол специального назначения, пропускающих инфракрасные лучи и поглощающих ультрафиолетовые лучи, кислотно- и жаростойких стёкол. Большое значение получили редкоземельные элементы и их соединения в химической промышленности, например, в производстве пигментов, лаков и красок, в нефтяной промышленности как катализаторы. Редкоземельные элементы применяют в производстве некоторых взрывчатых веществ, специальных сталей и сплавов, как газопоглотители. [53]

Европий входит в число наиболее сильных поглотителей тепловых нейтронов.

На этом базируется его применение в атомной технике и технике защиты от излучений.

В качестве материала противонейтронной защиты этот элемент интересен тем, что его природные изотопы  $^{151}\text{Eu}$  и  $^{153}\text{Eu}$ , поглощая нейтроны, превращаются в изотопы, у которых почти также велико сечение захвата тепловых нейтронов. Радиоактивный европий, полученный в атомных реакторах, использовали при лечении некоторых форм рака. Важное значение приобрел европий как активатор люминофоров. В частности, окись, оксисульфид и ортованадат иттрия  $\text{YVO}_4$ , используемые для получения красного цвета на телевизионных экранах, активируются микропримесью европия. Имеют практическое значение и дру-

гие люминофоры, активированные европием. Основу их составляют сульфиды цинка и стронция, фториды натрия и кальция, силикаты кальция и бария.

Ионы европия служат для генерации лазерного излучения в видимой области спектра с длиной волны 0,61 мкм (оранжевые лучи), поэтому оксид европия используется для создания твердотельных, и менее распространённых жидкостных лазеров. [54]

Селенид цинка (ZnSe) — бинарное соединение цинка и селена, прямозонный полупроводник с шириной запрещённой зоны 2.82 эВ при абсолютном нуле и 2.68 эВ — при комнатной температуре. Монокристаллы селенида цинка выращивают направленной кристаллизацией расплава под давлением, либо химическим парофазным осаждением. Данный материал используется в инфракрасной оптике, в том числе в высокомоощных CO<sub>2</sub>-лазерах.

Германий прозрачен как в терагерцовой области, так и на длине волны CO<sub>2</sub>-лазера. В инфракрасной технике германий применяется для изготовления оптических деталей приборов и устройств различного назначения. Это изделия в виде защитных окон, линз, акустооптических элементов (оптические приборы наземного, морского, воздушного базирования, для космических аппаратов). Германий применяется для высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей (солнечные батареи), а также используется в качестве детекторов в датчиках ионизирующих излучений. [55]

### **ДНК-коробочки**

Основной сферой применения является медицина. ДНК-коробочки подойдут для доставки лекарств: коробочки можно научить реагировать на присутствие определенной последовательности ДНК, характерной для определенного вируса, или раковой клетки, и открываться в нужном месте, высвобождая заключенное в них лекарство. [56]

### **Метаматериалы**

Было объявлено о создании метаматериала с отрицательным показателем преломления в видимой области, способном скрыть трёхмерный объект. Материал состоит из золотых наноантенн с подложкой из золота и фторида магния. Использование метаматериалов в создании маскировочной умной одежды для военных более перспективно, чем альтернативные подходы.

Благодаря тому, что метаматериалы обладают отрицательным показателем преломления, они идеальны для маскировки объектов, так как их невозможно обнаружить средствами радиоразведки. Тем не менее, существующие метаматериалы только в первом приближении имеют отрицательный показатель преломления, что приводит к значительным вторичным переизлучениям.

Значительно растёт интерес к использованию метаматериалов в радиотехнических приложениях и, в частности, в антенной технике. Основные области их применения: изготовление подложек и излучателей в печатных антеннах для достижения широкополосности и уменьшения размеров антенных элементов;

компенсация реактивности электрически малых антенн в широкой полосе частот, в том числе превышающей фундаментальный предел Чу; достижение узкой пространственной направленности элементарных излучателей, погруженных в метасреду; изготовление антенн поверхностной волны; уменьшение взаимного влияния между элементами антенных решеток, в том числе в МИМО-устройствах; согласование рупорных и других типов антенн.



Рисунок 51 — Маскировочная одежда из метаматериала

### **Гидрофобные покрытия**

В 2000 году на всемирной выставке в Ганновере была продемонстрирована автомобильная краска, способная к самоочищению под воздействием обычной воды, причем отличный результат достигается даже при сильном загрязнении. Развитие нанотехнологий позволило усовершенствовать способы очистки поверхности авто: сейчас уже существуют особые составы, которые распыляются на поверхность и растираются тканью. Они не только удаляют грязь, но

и покрывают поверхность слоем самоочищающегося вещества, которое действует в течение многих месяцев.

Еще одним достижением развития нанотехнологий стало создание экологически безопасных красок. Дело в том, что обычные краски содержат в составе растворители, которые во время сушки загрязняют окружающую среду. После изобретения новых порошковых веществ эта проблема была решена: такие порошковые краски не содержат вредоносных органических соединений. Еще одно изобретение, покрытие на основе наночастиц диоксида кремния, способно снизить появление царапин на 53%, а возникновение загрязнений – на 60% за счет эффекта лотоса. Такое нанопокрывание применяют для кузовов автомобиля, нанесения на колесные диски, поверхности судов и самолетов.

Важным шагом стало также изобретение гидрофобных покрытий для стекол в автомобилях, которые постоянно подвергаются действию воды и грязи, а потому становятся мутными и ухудшают обзор. Такие покрытия основаны на уменьшении площади соприкосновения капля воды с поверхностью стекла, что позволяет воде стекать, не оставляя подтеков и загрязнений. Использование таких веществ для стекол имеет массу преимуществ. Любые загрязнения: снег, дождь, пыль, смолы, капли масла, насекомые – легко удаляются даже потоком воздуха при движении автомобиля.

Эффект лотоса нашел свое применение не только в ав-

томобильной промышленности. Сегодня уже создано множество материалов, способных к самоочищению, обладающих гидрофобными свойствами, например, водоотталкивающие краски для фасадов, покрытия для поездов, незапотевающие стекла, непромокающая одежда и т.д. Одно из недавних достижений в текстильной промышленности – создание непромокаемой хлопчатобумажной ткани, не теряющей своих свойств после 250 стирок. Ее получают, пропитывая ткань коммерчески доступным фторированным акрилатным мономером с последующим облучением гамма-лучами, вызывающим полимеризацию мономера прямо на волокнах ткани. Получается покрытие, в котором хлопок связан с полимером. Полимер предотвращает впитывание воды, вода собирается в капли, которые, скатываясь с ткани, собирают и уносят с собой пылинки и загрязнения.[47]

#### **Биоразлагаемые материалы**

Группа биопластмасс на основе биоразлагаемых полимеров нашла применение в двух областях. Первая из них, высокоспециализированная, это отрасль медицины и тканевой инженерии, где они используются для производства таких элементов, как рассасывающиеся хирургические нити, скобы, клипсы, имплантаты, капсулы для контролируемого дозирования лекарственных препаратов и т.п. Вторая связана с производством в крупных масштабах упаковки, пленки, предназначенных для пищевых продуктов, пленки для термоформовки, мешков для мусора, лотков, стаканчиков, бутылок, столовых приборов, огородной плен-

ки, изделий одноразового использования, элементов интерьера, материалов для покрытия бумаги и для печати. Замена упаковок, изготовленных из обычных пластмасс, биоразлагаемыми аналогами вписывается в тенденции экономики сбалансированного развития и сокращения отходов.[45]

#### **Перовскит**

Синтетические перовскиты были определены как возможные недорогие базовые материалы для высокоэффективной коммерческой фотоэлектрической энергии – они показали эффективность преобразования до 25,5%. Экспериментально доказано, что если кремний заменить перовскитом или его искусственным аналогом, то КПД солнечной панели можно увеличить до 66%. Это приведет к тому, что в скором будущем стоимость солнечных панелей упадет примерно в 7 раз. Кроме этого, перовскитные солнечные панели демонстрируют превосходный срок службы – 3,7 года непрерывного использования без замены каких-либо компонентов.

Перовскит может генерировать лазерный свет.  $\text{LaAlO}_3$ , легированный неодимом, давал лазерное излучение с длиной волны 1080 нм. Матрицы из смешанного галогенида метиламмония свинца ( $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3 - \text{xClx}$ ), преобразованные в лазеры с вертикальным резонатором, излучающие поверхность с оптической накачкой (VCSEL), преобразуют видимый свет накачки в ближний ИК-лазерный свет с 70% КПД.

Из-за их высокой квантовой эффективности фотолюминесценции перовскиты могут быть хорошими

кандидатами для использования в светодиодах (LED). Светодиоды из перовскита в ближайшем будущем станут новым отраслевым стандартом из-за низкой стоимости и их эффективности в преобразовании энергии в свет. Более того, путем изменения атомного состава в структуре, светодиод можно легко настроить для излучения определенного цвета.[46]

Водоразделительные ячейки с использованием перовскитных фотоэлектрических элементов способны проводить электролиз воды для получения водорода и кислорода с эффективностью 12,3%.

Новые исследования перовскита показывают, что с его помощью скорость передачи данных может увеличиться в тысячу раз. Исследования показывают, что кристаллическая структура перовскита может вмещать широкий спектр катионов, что позволяет использовать его в различных сферах. Одним из свойств перовскита является его способность использовать терагерцовый спектр при передаче данных. Терагерцовый спектр описывает излучение в длинноволновых частотах от 100 до 10 000 гигагерц (между инфракрасными и радиоволнами).

На основе превосходных электрических и оптических характеристик галоидных перовскитов и простоте их производства создаются эффективные фотодетекторы. Но дополнительное наноструктурирование перовскитов открывает новые возможности по улучшению характеристик этих устройств. Например, с помощью наноимпринтной литографии удалось повысить чувствительность перовскитных фотодетекто-

ров в 35 раз по сравнению с обычными устройствами. Чувствительность перовскитных устройств также увеличивается за счет внедрения в них резонансных металлических наночастиц.

Инженеры-химики рассматривают перовскит на основе кобальта в качестве замены платины в каталитических нейтрализаторах для дизельных автомобилей.

#### **Конструкционные материалы**

Конструктивно умные материалы или конструкции включают:

- встроенные или закрепленные на поверхности датчики;
- встроенные или установленные на поверхности исполнительные механизмы (актуаторы);
- схемы элементов управления для реализации системы контроля (позволяющие обрабатывать данные от датчиков для принятия соответствующего решения).

Датчики и актуаторы в конструкциях копируют природу в значительной степени. Сообразно пяти чувствам (зрение, слух, обоняние, вкус и осязание) были разработаны визуальные/оптические, акустические/ультразвуковые, электрические, химические и тепловые/магнитные датчики. Отклики от этих первичных датчиков преобразуются в сигналы, которые передаются в центр обработки информации и блок управления (мозг) для дальнейшей обработки. В дополнение к обработке информации этот центр выполняет роль процессора, чтобы принять решение, основанное на входных данных. Для реализации концепции в самой простой форме наилучшим образом подходят основ-

ные материалы композитов, в которые при их изготовлении могут быть внедрены соответствующие датчики или актуаторы.

Умные материалы или конструкции уже нашли применение в реальной жизни. Например, это простые пьезоэлектрические громкоговорители, механизмы позиционирования окуляра на сканирующих микроскопах, самозатемняющиеся автомобильные стекла, автофокусирующиеся моторы для камер, домашний спортивный инвентарь с электрорегулируемым сопротивлением, саморазворачивающиеся устройства для поддержания коронарных сосудов в открытом состоянии после ангио-пластики, медицинская аппаратура формирования изображения и т.д. Конструкции, основанные на применении умных материалов, начинают находить применение в качестве средств уменьшения шума в кабинах вертолетов и самолетов, в промышленных нагнетателях воздуха, холодильниках и вентиляторах, для звукопоглощения при выхлопах в дизельных двигателях и в кабинах грузовиков; для демпфирования вибраций двигателей, в полуавтоматических автомобильных подвесках, радарных системах избегания столкновений и в системах безопасности, на ответственных производствах или платформах с телекамерами, для подавления вибрации дисководов в компьютерах, лопаток турбомашин и эха от подводной лодки, для контроля формы и демпфирования колебаний космических конструкций, телескопов и т.д. Список можно продолжить, но и этого достаточно, чтобы показать всю широту возможного применения

конструкций на основе умных материалов.

Для эффективной борьбы с шумами в автомобиле специальное устройство улавливает вибрацию кузова, анализирует ее и приводит в действие механизм ее компенсации. Например, на пьезокерамические пластины подается сигнал, вызывающий искусственные колебания кузова в противофазе к той вибрации, которая подлежит устранению. В результате наложения двух вибраций шум гасится.

В Центре аэрокосмических исследований в Брауншвейге (Германия) создан композиционный материал из пьезокерамических волокон. Встроенная в кузов автомобиля пластина из такого материала, если подвести к ней электрическое напряжение, способна практически полностью поглощать звуки и тем самым играть роль щита, надежно изолирующего салон от внешнего шума. Все дело в том, что интегрированные в пластину элементы из пьезокерамики гасят звуковые колебания, если электрическое напряжение подобрано соответствующим образом. Пьезокерамические элементы без особых проблем могут быть вмонтированы в композиционный многослойный материал из углеродных волокон непосредственно в процессе его создания. Известно, что самым значительным источником шума в салоне являются не звуки, проникающие снаружи, и не гудение двигателя, а вибрация элементов кузова. Причем, если традиционные методы звукоизоляции еще способны кое-как справиться с внешним шумом, то против шума, вызываемого собственно вибрацией кузова, они бессильны. Меж-

ду тем пьезокерамические элементы кузова могут не только с высокой точностью обнаружить источник такой вибрации и определить ее параметры, но и эффективно ее погасить. Исследователи фирмы «Карл Шенк» в Дармштадте (Германия) предложили новый амортизатор оригинальной конструкции на основе электрореологической жидкости. В его основе субстанция, обладающая способностью изменять свою вязкость в зависимости от напряженности внешнего электрического поля, причем диапазон этого изменения весьма широк: от текучей жидкости (в отсутствие внешнего электрического поля) до желеобразной, почти твердой консистенции (при соответствующей его напряженности). При этом процесс изменения вязкости протекает строго синхронно с изменением напряженности электрического поля. Такая способность адекватно и быстро, без запаздывания, реагировать на внешние условия позволяет использовать электрореологические жидкости для высокоэффективной амортизации нежелательных вибраций. Умная пьезокерамика находит применение не только в автомобилестроении, но и в авиационной промышленности. Самолетостроители используют ее для создания крыла с изменяющимся профилем. Такое крыло обретает способность оптимально приспосабливаться к аэродинамическим параметрам воздушного потока и тем самым обеспечивать более эффективное выполнение задач, стоящих перед самолетом на разных стадиях полета.

В аэрокосмических приложениях демпфирование ко-

лебаний является сложной задачей, так как вес демпфирующих устройств должен быть как можно меньше. Использование композитных материалов в сложных конструкциях, таких как высокоскоростные гражданские транспортные самолеты, средства выведения спутников на орбиту многократного использования, космические корабли, космические конструкции, бронированные машины, суда, вертолеты, ветровые турбины и другие, все более возрастает. Одним из факторов, которые ограничивают дальнейшее применение композитных материалов, является их относительно высокая восприимчивость к повреждению и, следовательно, проблемы безопасности и обслуживания. Различные типы повреждений материалов, к которым склонны композиты, включают в себя расслаивание, разрыв волокна, поглощение жидкости, ударные повреждения, разрушение матрицы, снижение прочности и жесткости при повышенных температурах, концентрацию напряжений. Таким образом, композитные материалы должны осматриваться или проверяться для обнаружения малых повреждений прежде, чем они станут катастрофическими для конструкции из-за возрастания их количества и, в результате, соединения с другими поврежденными участками. Повреждения в космических, аэронавигационных, механических, инженерных и морских конструкциях часто возникают от действия таких факторов, как усталость, коррозия и аварии. Эти повреждения, если не предпринять своевременные меры, могут возрастать с большой скоростью из-за концентрации напряжений

и деформаций в окрестности повреждения, что приводит к увеличению уровня вибраций, снижению величины допустимой нагрузки, ухудшению нормальной работы элемента конструкции и даже к катастрофическому отказу. В большинстве ситуаций срок службы поврежденных компонентов может быть увеличен за счет ремонта вместо непосредственной замены. Поэтому эффективный ремонт поврежденного элемента конструкции – это важная и актуальная проблема. Эти проблемы можно решить путем применения умных материалов для мониторинга конструкций в процессе их эксплуатации, так как они могут предоставить информацию, поступающую от системы датчиков, расположенных по месту измерения, в режиме реального времени, образуя пять уровней диагностики:

- обнаружение существования повреждения;
- определение местоположения повреждения;
- оценка величины повреждения;
- обеспечение частичного саморемонта повреждения;
- определение эксплуатационного ресурса конструкции.

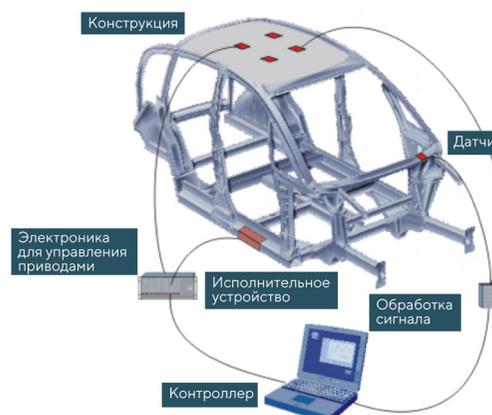


Рисунок 52 – Механизм подавления вибрации кузова автомобиля

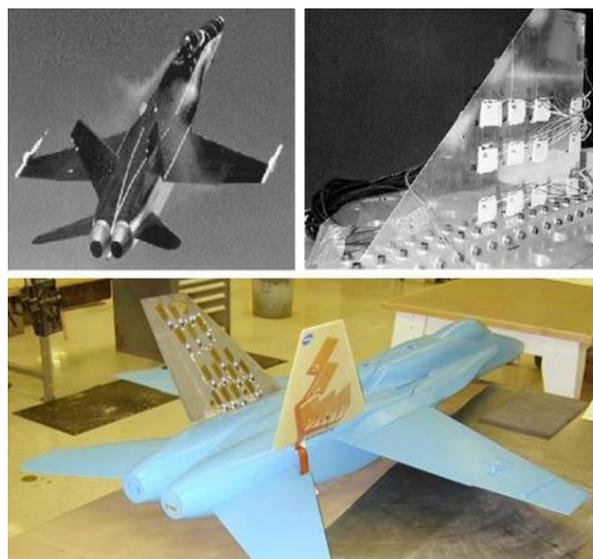


Рисунок 53 – Модель истребителя с макроволоконными сенсорами и актуаторами на килевых стабилизаторах

### Неразрушающий контроль

В методиках неразрушающих оценок наличия повреждений конструкции в качестве актуаторов и сенсоров эффективно применяется пьезокерамика (PZT). По этой методике PZT-заплата, выполняющая роль актуатора-сенсора, присоединяется к конструкции. Измерением электрического сопротивления, связанного с механическим состоянием рассматриваемой конструкции, может быть обнаружено изменение в свойствах объекта, вызванные повреждением. Преимущество этой техники состоит в том, что она может осуществлять непрерывный контроль on-line; PZT-заплата является очень легкой и достаточно малой, чтобы осуществлять контроль в недоступных местах. Эта методика была успешно проверена на таких конструкциях, как фермы, сложные укрепления стен, железобетонные мосты, трубопроводы и болтовые соединения в конструкциях.

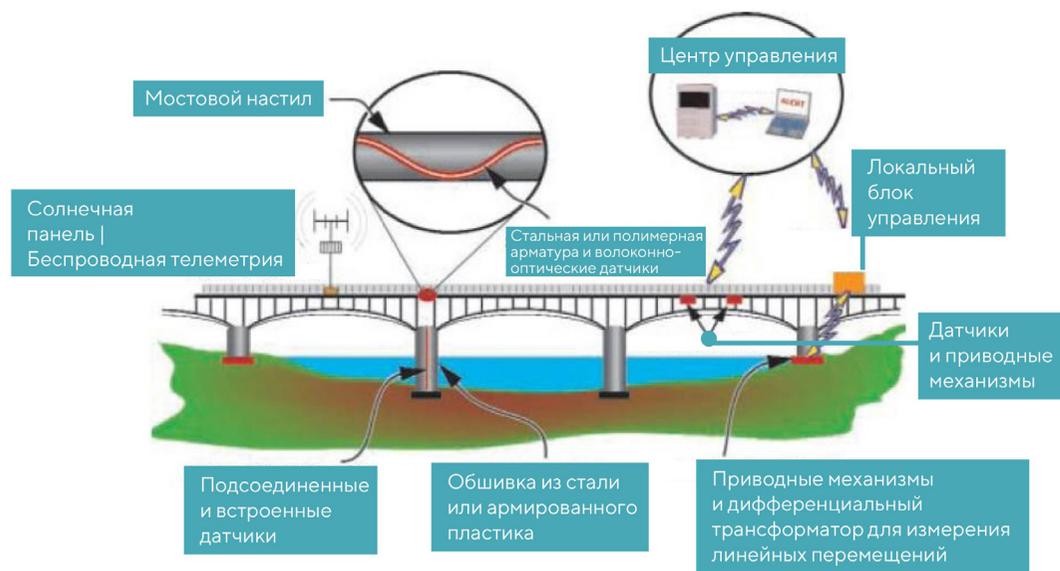


Рисунок 54 – Схема интеллектуального моста

Рассматривается метод обработки сигналов для обнаружения расслоения в композитных конструкциях. В частности, для обеспечения мониторинга структуры композита в режиме реального времени применена техника вейвлет-анализа, с помощью которой анализируется информация, поступающая с системы датчиков. Пьезоэлектрики используются для получения входного сигнала со специальной вейвлет-формой и измерения ответного сигнала. Далее ответный сигнал проходит через вейвлет-преобразование, и извлекается чувствительная к повреждениям составляющая от оригинального сигнала. Возможности метода рассмотрены на примерах расслоения при различных температурах и граничных условиях. Данные методики широко применяются для мониторинга состояния мостов, ответственных инженерных сооружений (промышленных, исторических или высотных зданий и т.п.) или конструкций, находящихся в сейсмоопасных регионах, а также и для дефектоскопии отдельных объектов, например, для обнаружения износа вагонных колес.



Рисунок 55 – Дефектоскопия вагонных колес

Также имеет место идея частично «излечивающей» себя конструкции при малых повреждениях активацией растягивающейся арматуры (проводками), выпуском (выдавливанием) клея или другими путями, пока еще реализованная в единичных, в основном лабораторных, приложениях. Самовосстанавливающиеся конструкции обладают лучшими эксплуатационными свойствами и более продолжительной работоспособностью по сравнению с обычными системами. Большая часть этих систем при появлении повреждения в ответ сразу же приступают к ремонту без внешней координации данного процесса. Исторически сложилось так, что с появлением резины и растворителей начали появляться самоуплотняющиеся материалы. Один из наиболее ранних патентов (1896г.) принадлежит Mercier, который разработал материал, залечивающий самостоятельно прокол стенки. Технологии самоуплотняющихся сосудов с жидкостью нашли свое развитие с появлением различных современных систем, в которых неконтролируемая утечка жидкости может быть чрезвычайно опасной и привести к невозможности эксплуатации или уничтожению самой системы. Это, например, скафандры, автомобили и самолеты. Хорошо спроектированная система может обрабатывать широкий диапазон рабочих условий, типичных повреждений и обладает способностью заблаговременного уведомления о критических повреждениях или при угрозе разрушения.

**Однако такого рода подход имеет целый ряд недостатков:**

- применяющаяся сенсорная система опирается на предсказуемость результатов, что является само по себе ограничивающим фактором во всем, кроме космической техники;
- реализованный подход самовосстановления с помощью термопластичных материалов ограничен в практическом применении, так как при работе по восстановлению целостности материала временно ослабляется конструкция, кроме этого, требуется такая геометрия элементов конструкций, чтобы материал мог легко поступить в поврежденные участки;
- недостаточное развитие алгоритмов обнаружения поврежденности: ранее существовавшее повреждение может поставить под угрозу базовые значения для системы мониторинга, снижает эффективность работы алгоритмов обнаружения повреждений;
- зависимость от времени алгоритмов обнаружения поврежденности; медленно растущие повреждения, такие как усталость, в настоящее время пока остаются незамеченными, так как применяемые методы основываются на довольно быстром отклонении отслеживаемой кривой состояния конструкции из-за повреждения (это аналогично различию между острыми и хроническими заболеваниями или болью в биологических системах).

В больших масштабах количество информации, поступающей от сети сенсоров, может стать настолько громоздким, что потребуется специальное управление

самовосстановлением конструкции. Биологическим системам удалось справиться с этой проблемой путем добавления уровней иерархии системы через промежуточные узлы фильтрации и делегированием различных функций, каждая из которых может быть применена к инженерным системам. Применение умных материалов все расширяется, и в настоящее время их можно встретить даже в бытовых приложениях. Для нового поколения лыжных трамплинов, теннисных ракеток, сноубордов, клюшек для гольфа и бейсбольных бит становится важным демпфирование возникающих колебаний, так как это не только увеличивает комфорт при их использовании, позволяет достигать лучших результатов, но и предотвращает от поломок.

**Спортивный инвентарь**

Фирма «Head Intelligence» первой в мире выпустила теннисные ракетки из пьезоволокон. Если до сих пор все попытки увеличить мощность ракеток ограничивались чистой механикой и манипуляциями с новыми материалами, то здесь ради той же цели разработчики впервые использовали электричество. Весь секрет таких ракеток заключен в пьезоэлектрических волокнах, способных преобразовывать механическую энергию мяча в электрический импульс (волокна вырабатывают электричество при любом их малейшем изгибе или деформации). За счет этой «искры», проскакивающей по ободу за менее чем тысячную долю секунды, ракетка в момент удара приобретает дополнительную жесткость, отсюда и новый резерв мощности и к тому же полное отсутствие вибрации. Эти технологии уже

опробованы в горных лыжах и сноубордах. Развитие умных материалов, несомненно, становится одной из важнейших задач во многих областях науки и технологий, таких как микроэлектроника, информатика, медицина, науки о жизни, энергетика, транспорт, техника безопасности и военные технологии. [19]

**Медицина**

В ближайшем будущем ожидается активное развитие технологий создания наноструктурированных биосовместимых медицинских материалов в первую очередь по двум направлениям:

- разработка материалов для изготовления имплантатов и заменителей различных тканей (например, оксидные или фосфатные биопокртия наносятся на прочные и относительно легкие титановые имплантаты для предотвращения отторжения живыми тканями);
- создание материалов, аналогичных по свойствам и структуре тканям человеческого тела. Примером могут служить костные имплантаты с пористой структурой на основе фосфатов кальция. В оптимальном варианте медицинские материалы должны быть построены натуральными тканями.

**Приборостроение**

Датчики физических величин на основе наноматериалов могут использоваться в специальных измерительных приборах. Сюда входят две подгруппы инновационных продуктов:

- датчики для измерения электромагнитных волн жесткого рентгеновского излучения, ультрафиолето-

вого излучения, инфракрасного излучения, радиоизлучения и других;

- датчики для измерения линейных и угловых смещений на основе материалов из нанотрубок с нулевым коэффициентом поперечной деформации, ускорений на основе туннельного эффекта с чувствительными наноэлементами, терагерцового излучения с использованием планарных наноструктур на основе ультратонких металлических пленок; оптические наносенсоры механических напряжений на основе упругих инвертированных фотонных кристаллов и другие.

По своей сути технология применения умных материалов и конструкций является весьма междисциплинарной областью, охватывающей фундаментальные науки физику, химию, механику, компьютерную технику и электронику, и прикладные отрасли науки и техники, такие как авиация и машиностроение. Именно этим можно объяснить довольно медленный и осторожный прогресс в применении интеллектуальных конструкций на практике, несмотря на то, что научные разработки в этой области продвигаются очень быстро.[10]

### **МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ПОРОШКИ ДЛЯ АДДИТИВНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Аддитивное производство (АП) — это класс технологий изготовления деталей сложной формы с использованием трехмерной компьютерной модели путем последовательного нанесения материала, обычно слой за слоем.

В аддитивных процессах с использованием металлов детали формируются путем последовательного нанесения или спекания металлического порошка. Эта возможность интересна тем, что позволяет изготавливать детали точной или близкой к заданной форме без какой-либо оснастки с минимальной последующей обработкой или даже без нее. Это представляет особый интерес для аэрокосмической и биомедицинской промышленности, поскольку позволяет производить продукты с высокими эксплуатационными характеристиками при низких общих затратах.

Сегодня быстрое прототипирование остается доминирующей областью применения процессов аддитивных процессов. Некоторые из направлений применения технологии АП — это быстрое изготовление оснастки, в частности, изготовление пресс-форм. По мере совершенствования существующих технологий и разработки новых и более совершенных технологий аддитивного производства они все более широко используются:



Рисунок 56 — Доля различных отраслей в структуре доходов поставщиков услуг АП

### Медицина

В медицинских приложениях часто необходимо производить изделия, которые имеют индивидуальную форму и функции из-за уникальности каждого пациента. Технологии АП могут сделать производство персонализированной продукции рентабельным с минимальными дизайнерскими компромиссами. Еще одна мотивация для использования АП в медицинских приложениях – размер рынка.

Использование АП позволяет изготавливать имплантаты с пористой структурой, которая обеспечивает прорастание тканей. Главное преимущество АП-технологий – это возможность адаптировать техническое решение задачи медицины к индивидуальным данным пациента. В области протезирования АП позволяет разрабатывать и производить легкие и недорогие составные протезы, например, руки или кисти рук, которые упрощают сборку сложной конструкции и превращают ее в единый продукт.

Технологии АП также используются для массового производства продукции, которая используется в стоматологии. Возможность изготавливать однотипные изделия небольшими партиями с минимальными затратами делает технологии АП эффективными в этой области, где у каждого клиента свои требования. Процесс SLM очень хорошо подходит для стоматологических применений, поскольку изделия имеют сложную геометрию, требуют значительных корректировок и приводят к высоким общим затратам. Кроме того, изготовление множества уникальных деталей в одном производственном цикле позволяет производить массовую индивидуализацию продукции.

Технологии АП также используются в производстве слуховых аппаратов: два ведущих производителя – Siemens и Phonak, используют АП для серийного производства персонализированных слуховых

аппаратов. Как и в случае с другими медицинскими приложениями, процесс проектирования начинается с данных пациента, полученных из физического или электронного слепка уха для создания трехмерной производственной модели. Процессы SLS и SL в настоящее время используются для производства слуховых аппаратов. Переход на технологию АП предполагает почти полностью автоматизированное решение проблемы за счет сокращения времени доставки оборудования до одного дня и увеличения доли аппаратов, подошедших с первой примерки до 95%.

#### **Авиационно-космическая промышленность**

Аэрокосмическая промышленность проявляет живой интерес к аддитивным технологиям с момента их появления. Возможность устранить многие ограничения от проектирования до производства позволяет реализовать решения, повышающие эффективность и снижающие массу изделия. Кроме того, по своей природе этот рынок требует мелкосерийного производства высококачественных деталей, поэтому возможность избежать необходимости в инструментальной оснастке, которую обеспечивает технология АП, дает значительные преимущества. Однако требования к сертификации для этих критически важных применений очень строги, так как отказ компонентов может повлечь за собой высокий риск травмы или смерти. Однако ряд систем и материалов сертифицирован, и сегодня аддитивные технологии используются для мелкосерийного производства деталей самолетов. Корпорация General Electric объявила о

возможности серийного производства топливных форсунок для своего нового турбовинтового двигателя LEAP с использованием процесса DMLS из порошка Cr-Co. Компания отмечает, что имеет возможность производить не менее 25 000 форсунок в год, при том, что на один двигатель требуется 19 форсунок. Другие компании, работающие в данной отрасли, такие как Lockheed Martin, Boeing и Siemens, также изучают возможности аддитивного производства. Эксперты сообщают, что Boeing произвел более 20 000 деталей с использованием технологий АП, которые уже используются в военной и гражданской авиационной технике компании.

Другой пример — охлаждающий трубопровод в системе контроля состояния среды на Boeing F/A-18E/F Super Hornet для военно-морских сил США. Технология SLS позволила инженерам объединить различные каналы в единые части, интегрировать в них крепежные механизмы и сократить общее количество компонентов. Это стало возможным благодаря сложной геометрии деталей, реализованной методами аддитивного производства. В результате процесс сборки был упрощен и сократилось общее время, а масса самолета уменьшилась. Исследования экономии затрат, вызванной использованием аддитивных технологий в авиакосмической промышленности, указывают на значительный выигрыш при производстве некоторых деталей. Например, использование процесса LENS для восстановления лопаток турбины на военном складе в Аннистоне, США, дает экономию в размере

6297 долларов США на деталь при годовой экономии в размере 1 444 416 долларов США. Точно так же расчеты показывают, что восстановление турбинных лопаток двигателя AV8B из титанового сплава Ti-6Al-4V ежегодно экономит 715 000 долларов. Компания VeAM, которая производит оборудование по технологии CLAD, также восстанавливает пять типов деталей турбинных двигателей Pratt & Whitney, увеличивая их срок службы с 10 000 до 60 000 часов. Таким образом, уже было восстановлено более 600 деталей, при этом экономия в десять раз превышает стоимость детали. Следует отметить, что восстановить эти детали возможно только аддитивным способом. Переход НАСА к аддитивному производству жаростойких инжекторов для ракетных двигателей сократил время производства с шести месяцев до трех недель и снизил затраты с 10 000 до 5 000 долларов на деталь. Существуют и другие примеры экономии затрат на детали самолетов, в том числе прогнозируемая экономия в размере 2,5 миллионов долларов просто за счет снижения веса металлических крепежных деталей в салоне на 50-80% при изготовлении с использованием аддитивных технологий.



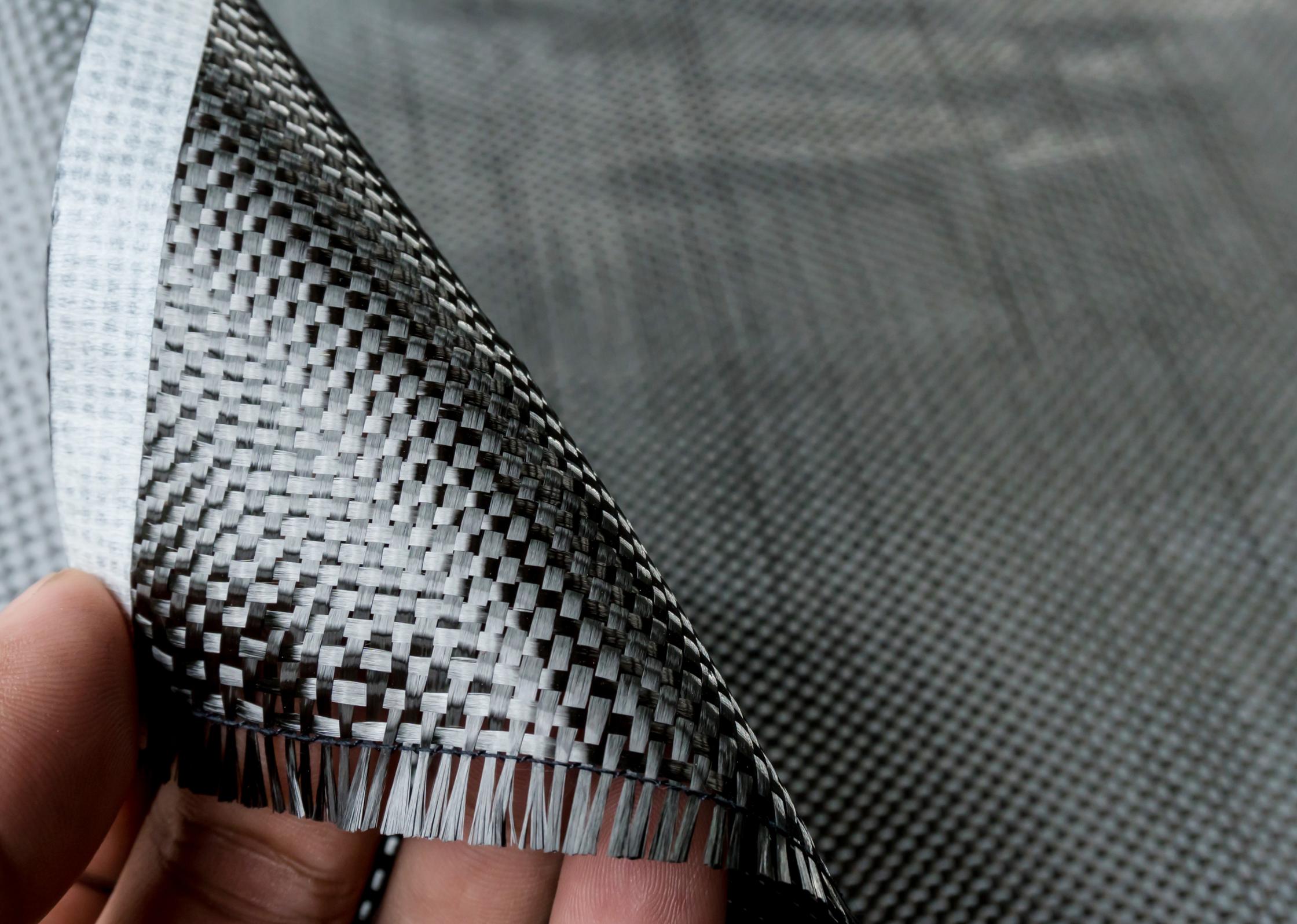
Рисунок 57 – Турбинные лопатки, произведённые из металлического порошка

### Автомобилестроение



Рисунок 58 – Автомобиль Strati

Из-за относительно высокой стоимости и низкой производительности АП –технологий их использование в автомобильной промышленности по-прежнему в основном связано с автоспортом. Высокие объемы производства и требования к качеству серийных автомобилей привели к тому, что применение аддитивных технологий было сосредоточено на создании прототипов и вспомогательной оснастки, помогая компаниям сократить циклы разработки и производства. Компания Daimler AG в сотрудничестве с Concept Laser и Институтом лазерных технологий им. Фраунгофера заменила дорогостоящие и длительные процессы литья, использовавшиеся для изготовления больших функциональных металлических деталей, на процесс АП, с помощью которого была оптимизирована геометрия и вес деталей. Компания Local Motors продемонстрировала грядущие перспективы технологии АП в автомобильной промышленности, напечатав на 3D-принтере первый пригодный для эксплуатации автомобиль под названием Strati. Этот двухместный электромобиль впервые был официально представлен публике в 2014 году в Чикаго. Strati состоит всего из 49 элементов, включая кузов, который был изготовлен с помощью АП. В то время как типичный коммерческий автомобиль состоит из нескольких тысяч частей.[20]



## ПРИМЕРЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ

### ПРИМЕНЕНИЕ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК ДРАЙВЕР ОТРАСЛЕЙ ОПК

Дочерние общества корпорации «Ростех», которые специализируются на исследованиях, разработках и производстве инновационных полимерных композитов, серийно производят блоки ПКМ для ракетоносителей «Протон» и «Ангара», около 36% деталей изготовлено из композиционных материалов, что способствовало снижению веса на 12%. Также производятся элементы звукопоглощающих панелей для авиационных двигателей. Масса самолетов ПАК ДА, ПАК ФА, Ил-112 снизилась на 20-30% за счет их использования ПКМ в их конструкции, также уменьшилось количество деталей, сократился срок изготовления и, соответственно, стоимость воздушного судна.



Рисунок 59 – Самолёт ПАК ДА

Для защиты кабины боевых вертолетов применяется керамико-пластиковая броня. Грудной щиток «протектор» и бронированное сиденье экипажа позволили обеспечить круговую защиту вертолета в диапазо-

не 360° в секторе обстрела.

На сегодняшний день элементы корпусов вертолетов изготавливаются из композитных материалов.

В России лопасти из углеродного волокна используются на модернизированном боевом вертолете Ми-28НМ и многоцелевых вертолетах Ми-38, Ми-35М. Данное решение привело к увеличению их крейсерской и максимальной скорости.

В конструкциях центроплана, крыла, фюзеляжа и хвостового оперения применяются композитные материалы. Завод «АэроКомпозит-Ульяновск» серийно производит композитное крыло для российского авиалайнера МС-21. Российский многофункциональный истребитель пятого поколения Т-50 (ПАК ФА) имеет фюзеляж из радиопоглощающих композитных материалов. В общей массе пустого самолета их доля составляет 25%. Благодаря использованию композитных материалов количество деталей было значительно уменьшено.

Фюзеляж истребителей МиГ-29К/КУБ и МиГ-35 также на четверть состоит из современных композитов. Для изготовления деталей из углеродного волокна корпорация МИГ запустила специальное производство в г. Луховицы. Используются материалы российского производства, в том числе углеродное волокно. ФГУП «Крыловский государственный научный центр» разработал радиопоглощающие материалы для строительства корветов ближней морской зоны. Подобные исследования с целью получения новых легких радиопоглощающих материалов на основе наногле-

родных соединений для военной авиации успешно проводились в Научно-исследовательском центре Прикладных нанотехнологий в Санкт-Петербурге. Компания «Легар» (г. Санкт-Петербург) освоила производство полимерных консолей для малых и средних судов. Консоли соответствуют всем современным техническим требованиям, а также имеют отличный дизайн.

Фирма «Композит-Проф» разработала и внедрила технологию производства панелей промежуточного слоя, которые используются в качестве среднего слоя трехслойного полимерного композиционного материала. Данный материал используется в производстве плоских участков палуб, переборок, перегородок, надстроек надводных судов, а также кораблей, которые эксплуатируются в море и пресной воде. [21]

### Аэрогель для сбора космической пыли



Рисунок 60 – Коллектор ловушки для кометных частиц и звездной пыли для аппарата «Stardust»

Активное применение аэрогеля началось к концу XX века, в первую очередь, в космонавтике. 7 февраля 1999 года с помощью ракеты-носителя «Дельта-2» в космос была запущена автоматическая межпланетная станция «Stardust», предназначенная для исследования кометы 81P/Вильда. Одной из основных задач был сбор кометных проб в виде мельчайших частиц, летящих в хвосте кометы, а также частиц звездной пыли. Для этого на аппарате была установлена специальная ловушка для улавливания мелких частиц. Она представляла собой решетку, разделенную на 132 ячейки, в которые были размещены блоки кварцевого аэрогеля. Одна сторона решетки была обращена к комете для улавливания ее частиц, другая же сторона была предназначена для сбора частиц звездной пыли. За счет низкой плотности аэрогеля микрочастицы, попадая в ловушку, тормозились, не перегреваясь и, соответственно, не разрушаясь. В последствии данная ловушка благополучно вернулась на Землю для изучения. Данная миссия позволила узнать новые детали о формировании Солнечной системы. [39]

### Новый бетон с добавкой графена стал на 150% прочнее обычного



Рисунок 61 – Бетонные блоки с добавкой графена

Графен – материал, состоящий из одного слоя связанных между собой атомов углерода. Он является одним из самых уникальных искусственных материалов в истории человечества. Недавно ученые Университета Эксетера (Великобритания) нашли ему очередное применение – в качестве присадки для создания нового типа бетона.

Для этого команда исследователей разработала технику суспензирования хлопьев графена в воде, после чего полученная смесь добавляется в традиционные бетонные ингредиенты – в цемент и наполнитель. Как сообщается, данный процесс не является затратным и вполне совместим с уже существующими технологиями производства бетона.

В ходе опытов было установлено, что прочность на сжатие графенового бетона по сравнению с обычным

выросла на 146%, а прочность на изгиб – на 79,5%, при этом водонепроницаемость снизилась на 400 %. Новый материал полностью соответствует британским и европейским строительным стандартам.

Полученные показатели позволят значительно увеличить срок эксплуатации объектов, построенных из графенового бетона, и снизить его расход при строительстве примерно на 50 %. Это позволит улучшить и экологическую составляющую процесса, поскольку производство цемента является одним из основных источников выбросов CO<sub>2</sub>. По расчетам ученых, они сократятся на 446 кг/т. [22]

### Применение графена для защиты от бактериальной коррозии



Рисунок 62 – Труба с коррозионными повреждениями

Уже в недалеком будущем графен можно будет использовать в борьбе с бактериальной коррозией металлических труб.

В очистных сооружениях широко распространены сульфатовосстанавливающие бактерии, которые живут колониями в виде биопленок на поверхности труб и другого оборудования. Уже через 10 дней после очистки металлических поверхностей бактерии вновь появляются на них, приводя к коррозии и последующему разрушению.

Бактерии поражают трубы и изнутри, даже несмотря на полимерные покрытия, которыми они, как оказалось, вполне успешно питаются. Со временем эти покрытия становятся хрупкими, растрескиваются и их фрагменты попадают в водопровод.

Научный сотрудник Школы горнорудной добычи и технологий Южной Дакоты (США) Говинд Чилкур предложил решить эту проблему, используя в качестве покрытия труб графен. В ходе лабораторных испытаний он обнаружил, что даже один слой графена толщиной менее 1 нм предотвращает попадание сульфатовосстанавливающих бактерий на внутреннюю поверхность металлических труб.

С учетом того, что графен является одним из самых прочных искусственных материалов, его целесообразно использовать при создании защитных покрытий вместо столь популярных полимеров.[23]

**Графеновая пена выдерживает нагрузку в 3000 раз больше собственного веса**



Рисунок 63 – Графеновая пена

Графен в большинстве случаев встречается в виде двумерной структуры. Это не позволяет использовать такие его преимущества, как прочность, легкость, электропроводность и теплопроводность. Ученые из Массачусетского технологического института разработали трехмерную версию графена, которая в 10 раз прочнее стали. Теперь их коллеги из Университета Райса использовали углеродные нанотрубки для упрочнения графеновой пены. Полученный трехмерный материал может выдержать нагрузку, превышающую собственный вес в 3000 раз и ему можно придать практически любую форму.

Подобно тому, как обычная металлическая арматура укрепляет бетон, графеновая пена структурируется вокруг углеродных нанотрубок несколькими концентрическими слоями. Ранее ученые уже создавали

трехмерную графеновую пену и использовали нанотрубки для укрепления графена в формате 2D. Теперь им удалось объединить в одно целое пену и графеновую арматуру.

Исследователи смешали нанотрубки с порошкообразным катализатором из никеля и сахара для получения углерода. Высушенные гранулы вещества были затем спрессованы в виде винтообразной оснастки. Углерод и сахар при этом превратились в графен, благодаря процессу химического осаждения. После удаления остатков никеля остался чистый углерод.

Исследования показали, что графеновая пена с арматурой из нанотрубок даже при нагрузке в 8500 раз больше своего веса деформируется всего на 25 %. Как уже было сказано, из нее можно изготавливать изделия практически любой формы. Один из первых опытов применения — электроды литий-ионных конденсаторов, которые показали высокую механическую и химическую стабильность.[24]

**Применение графена для производства аккумуляторных батарей**

Расположенная в китайском Гуанчжоу компания GAC Group объявила о начале испытания инновационных электрокаров на графеновых аккумуляторах. Последнее не так давно были представлены другим разработчиком — 3DG.

По словам специалистов, понадобилось время, чтобы изготовить первую партию аккумуляторов нового типа, что позволяет теперь провести полноценные испытания электрокаров.

Графеновые батареи являются новинкой современной индустрии.

Их отличительная особенность — способность быстро аккумулировать электрический заряд. Нужно всего 8 минут, чтобы заполнить батарею от нуля до 85%. Это решает проблему с мобильностью машин на электрической тяге. Обычно для зарядки нужно несколько часов.[35]

#### Использование композитов в строительстве мостов



Рисунок 64 — Мостовая конструкция с применением композитов

Одной из все более расширяющихся областей применения композиционных материалов является мостостроение. Использование стеклопластика открывает перспективный путь строительства мостов из новых материалов. Рассматриваемое строительство — мост длиной 40 метров, протянутый поперек одной из наиболее загруженных железных дорог в Дании. Первый композитный мост изготовлен для железнодорожных переходов. Ключевым условием создания моста, для

одной из наиболее загруженных железных дорог Дании, было то, что он должен был быть установлен в самые сжатые сроки. В то же время сооружение должно было соответствовать определенным практическим и эстетическим критериям. Мост был смонтирован за 16 часов. Работа была выполнена ночью. Мост состоял из трех компонентов, которые были установлены на опоры с болтами — единственные элементы моста, требующие соединений.

Новый сложный мост был построен в Швейцарских Альпах прошлой осенью. Этот мост состоит из двух элементов, весящих по 900 кг, которые были установлены при помощи вертолета. Элементы были склеены и соединены болтами вместе. Мост, собранный из стали, едва ли смог бы транспортироваться вертолетом. Еще одно преимущество проекта состоит в том, что мост может быть легко демонтирован в случае весенних наводнений.[25]

#### Лопастей ветрогенераторов из углеродного волокна вместо стекловолокна



Рисунок 65 — Ветрогенераторы с лопастями из углеродного волокна

Такие крупные компании как Vestas Wind Systems и Gamesa Technology Corporation разработали свои турбины с использованием карбонового волокна и, в силу этого, вся стоимость системы меньше, чем система с полностью стекловолоконными лопастями. Плотность карбонового волокна (1,7-1,8 г/см<sup>3</sup>) много меньше, чем плотность стекловолокна (2,5 г/см<sup>3</sup>), при этом его давление (220-240 ГПа) гораздо больше, чем у стекловолокна (72 ГПа). Таким образом, становится возможным изготовление более тонких лопастей. Более тонкие, а соответственно более легкие лопасти требуют менее надежные турбины и компоненты башни, поэтому экономия на каскад оправдывает допол-

нительные затраты на углерод. Это позволило увеличить КПД турбины. Например, переход на карбоновое волокно позволило Vestas, на начальном этапе, чтобы добавить 5 м/16 футов в длину лопасти без дополнительного утяжеления. Турбина Vestas V112-3MW предназначена для низкого и среднего ветра и имеет длину лопасти 54,6 м/179-футов. Эти лопасти имеют такую же ширину, как 4 м/144-футовых лопасти компании, но их площадь составляет на 55 процентов больше. В результате выходная энергия значительно выше.

Компания GE Energy (Greenville) представив лопасти нового поколения из карбонового волокна, лопасти имеют длину 48,7 м/160 футов для турбин 1,6-100. Старший ведущий инженер энерго-производственных технологий GE, отметил, что при большей автоматизации и совершенствования производственных процессов из углеродного волокна, приведет к увеличению длины лопасти в системе 1,6 МВт, что позволит увеличить КПД системы. Решение компании GE поставить ротор диаметром 100 метров (328 футов) на турбине 1,6 МВт обратило внимание многих компаний в отрасли ветроэнергетики.[26]

#### **Использование металлопорошка и аддитивных технологий в производстве**

Компания General Electric (GE) заявила о готовности к массовому производству топливных форсунок для своего нового турбовинтового двигателя LEAP с помощью процесса DMLS из кобальтохромового порошка. GE отметила, что может производить по меньшей мере 25 000 форсунок в год (одному двигателю требуется 19 форсунок).

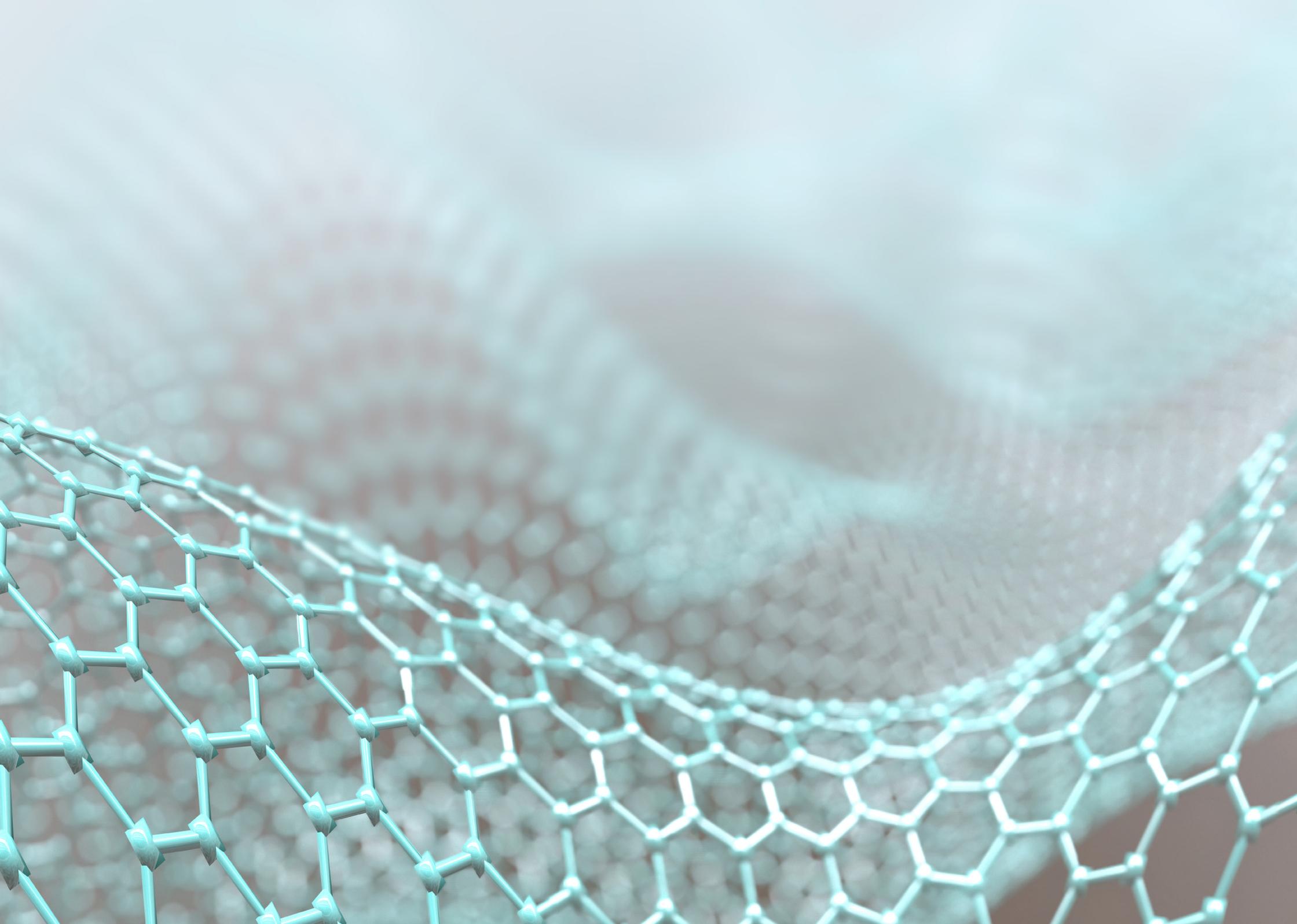
Компания Westinghouse Electric сообщила, что применила 3D-печатный компонент ядерного реактора — заглушку тепловыделяющей сборки, загруженной в реактор первого блока АЭС «Байрон» в штате Иллинойс.

«Всероссийский институт легких сплавов» в феврале 2018 года сообщил о том, что полученные им металлические порошки были использованы в качестве материала для жаровой трубы камеры сгорания турбореактивного двигателя ДГ-4М, применяемого в ракетных комплексах. Труба была изготовлена Самарским национальным исследовательским университетом им. академика С.П. Королева методом селективного лазерного сплавления, относящегося к аддитивным технологиям.[27]



## КООПЕРАЦИОННЫЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПОЧКИ

Производитель	Заказчик	Продукт
АО «Полема»	ИФТТ РАН	Металлические порошки
АО «Полема»	МГТУ им. Н.Э. Баумана	Металлические порошки
ОАО «ВИЛС»	ОДК-Авиадвигатель	Металлические порошки
ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина	ПАО «Туполев»	Композиты
ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина	ПАО «Компания «Сухой»	Композиты
ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина	РКК «Энергия» им. С.П. Королёва	Композиты
ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина	АО «Авиастар-СП»	Композиты
ООО «Русграфен»	Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова	Графен
ООО «Русграфен»	Институт общей физики им. А.М. Прохорова	Графен



## ОСНОВНЫЕ ПОСТАВЩИКИ И ПРОИЗВОДИТЕЛИ

### МИРОВЫЕ КОМПАНИИ

#### Materion AMC



Адрес: 6070 Parkland Blvd. Mayfield Heights, OH 44124  
Телефон: +1216 486 4200  
E-mail: н/д  
Сайт: <https://materion.com>

Американская компания, основанная в 1931 году. Головной офис расположен в Кливленде. Является одним из мировых лидеров в разработке и производстве передовых материалов для авиационной, космической и автомобильной промышленности.

#### Morgan Advanced Materials



Адрес: York House Sheet Street Windsor  
United Kingdom  
SL4 1DD  
Телефон: +44 (0) 1753 837000  
E-mail: н/д  
Сайт: <https://www.morganadvancedmaterials.com/>

Глобальный производитель специализированной продукции с использованием углеродного волокна, керамики и других композиционных материалов для широкого спектра использования. Штаб-квартира компании находится в Виндзоре (Великобритания). Компания основана в 1856 году.

#### Huntsman Corporation



Адрес: 500 Huntsman Way, Salt Lake City, UT 84108  
Телефон: 801-584-5700  
E-mail: н/д  
Сайт: <https://www.huntsman.com>

Американская химическая компания, основанная в 1982 году в США Джоном Хантсманом. Huntsman занимается производством различных видов химической продукции, таких как полиуретаны, красители, полимеры и прочие. Штаб-квартира — в Солт-Лейк-Сити (штат Юта).

### Hexcel Corporation



Адрес: 281 Tresser Blvd 16th Floor, Stamford, CT 06901  
Телефон: +1 203-969-0666  
E-mail: н/д  
Сайт: [www.hexcel.com](http://www.hexcel.com)

Американская компания, занимающаяся производством промышленных материалов, расположенная в Стэмфорде (штат Коннектикут). Компания разрабатывает и производит конструкционные материалы. Hexcel была основана в 1948 году как California Reinforced Plastics и далее переименовывалась. Продукция компании используется в авиакосмической и автомобильной промышленности, а также для производства товаров для спорта.

### Hanwha Advanced Materials Corporation



Адрес: 86, Cheonggyecheon-ro, Jung-gu, Seoul, Korea  
Телефон: 82.2.729.2100  
E-mail: н/д  
Сайт: <http://hwam.co.kr>

Компания производит продукты и решения для автомобильной промышленности, электроники и солнечной энергетики. Компания предлагает автомобильные материалы, в том числе термопластики, армированные стекловолокном, легкие армированные термопласты, вспененный полипропилен, листовую формовочную массу и термопласты, армированные длинными волокнами; солнечные материалы, в том числе лист EVA; электронные материалы, в том числе линктрон; оказывает консультационные услуги. Hanwha Advanced Materials Corporation была основана в 2005 году, она является дочерней компанией Hanwha Chemical Corporation (Южная Корея).

### LPW Technology Ltd



Адрес: Dennis Road Widnes, WA8 0GU United Kingdom  
Телефон: 44-1928-240-530  
E-mail: н/д  
Сайт: [www.lpwtechnology.com](http://www.lpwtechnology.com)

Компания была основана в Великобритании в 2007 году. Компания специализируется на разработке, производстве и поставке ультрачистых металлических порошков для аддитивного производства.

### Raymor Industries



Адрес: 3765 La Verendrye, Boisbriand,  
Québec J7H 1R8, Canada  
Телефон: +1 450 434 6266  
E-mail: [nanotechinfo@raymor.com](mailto:nanotechinfo@raymor.com)  
Сайт: <http://raymor.com/>

Канадская компания была основана в 1980 году как компания по добыче полезных ископаемых. С 2006 года компания начала развивать свои возможности в области плазменной обработки, что привело к появлению таких направлений деятельности, как производство углеродных нанотрубок и сферического титанового порошка, полученного плазменным методом.

### TLS Technik GmbH & Co. Spezialpulver KG



Адрес: PC-Straße 5, 06749 Bitterfeld-Wolfen  
Телефон: +49 (0)3493 72306  
E-mail: [info@tls-technik.de](mailto:info@tls-technik.de)  
Сайт: <https://www.tls-technik.de>

Немецкая компания, основанная в 1994 году в городе Биттерфельд. В настоящее время компания занимается производством порошковых материалов из таких металлов, как титан, алюминий, медь, никель и других.

### Memry Corporation



Адрес: 3 Berkshire Boulevard  
Bethel, CT 06801  
Телефон: +1 (203) 739-1100  
E-mail: н/д  
Сайт: <https://www.memry.com/>

Мировой лидер в области производства нитиноловых компонентов. Компания производит полный спектр работ по производству и последующей обработке нитинола. Компания основана в 1981 году в Стэмфорде (США).

## РОССИЙСКИЕ КОМПАНИИ

### Directa Plus



Адрес: 3rd Floor, 11-12 St. James's Square, SW1Y 4LB – London, United Kingdom

Телефон: н/д

E-mail: н/д

Сайт: <https://www.directa-plus.com>

Один из крупнейших мировых производителей и поставщиков продуктов на основе графеновых нанопластинок для использования на потребительском и промышленном рынках. Компания основана в 2003 году в Великобритании.

### OCSiAl



Адрес: 1 Rue de la Poudrerie, L-3364, Leudelange, Grand-Duché de Luxembourg

Телефон: +352 27990373

E-mail: [europa@ocsial.com](mailto:europa@ocsial.com)

Сайт: <https://ocsial.com>

Люксембургская компания, владелец российского предприятия по производству нанотрубок ОКСиАл. Крупнейший в мире производитель однослойных углеродных нанотрубок по собственным технологиям и промышленных модификаторов на их основе.

### ОНПП «Технология» им. А. Г. Ромашина



Адрес: 249031, Российская Федерация, Калужская область, г. Обнинск, Киевское шоссе, 15

Телефон: +7 484 399 68 68

E-mail: [info@technologiya.ru](mailto:info@technologiya.ru)

Сайт: <https://technologiya.ru>

Предприятие образовано в 1959 году, с 2010 года входит в состав Государственной корпорации «Ростех». Компания является одним из ведущих российских государственных предприятий в области производства неметаллических полимерных, композитных и керамических материалов для нужд ракетно-космической и авиационной промышленности, водного транспорта, энергетики и других отраслей промышленности.

#### АО «ВНИИСВ»



Адрес: 170032, Россия, г. Тверь, Московское шоссе, 157  
Телефон: +7 (4822) 53-25-57  
E-mail: office@vniisv.ru  
Сайт: <http://www.vniisv.com/>

Предприятие основано в 1956 году. Предприятие ведет разработки в области синтетических малотоннажных волокон, нитей и волокнистых материалов специального назначения.

#### ООО «Алабуга-Волокно»



Адрес: 423600, Республика Татарстан, г. Елабуга, ул. Ш-2, стр. 11/9  
Телефон: +7 (855) 575-34-00  
E-mail: alabuga-volokno@umatex.com  
Сайт: <https://umatex.com/company/alabugavolokno/>

Предприятие было запущено в промышленную эксплуатацию в 2015 году. Предприятие занимается производством углеродного волокна по технологии, разработанной российскими инженерами, для последующего использования в производстве композиционных материалов.

#### МОСКОВСКИЕ КОМПАНИИ

#### АО «Препрег-СКМ»



Адрес: г. Москва, Россия, Волгоградский проспект, д.42 к.8  
Телефон: +7 (495) 777-01-23  
E-mail: info@prepreg-acm.com  
Сайт: <https://umatex.com/company/prepreg-acm/>

Компания, основана в 2009 году для производства тканей и препрегов на основе углеродного волокна для использования в гражданской авиапромышленности, ветроэнергетике, строительстве, судостроении и других отраслях промышленности.

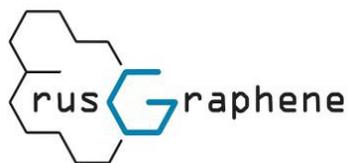
#### ФГУП «ВИАМ»



Адрес: г. Москва, ул. Радио, д. 17  
Телефон: +7(499)261-86-77  
E-mail: [admin@viam.ru](mailto:admin@viam.ru)  
Сайт: <https://viam.ru/>

Ведущий материаловедческий центр Российской Федерации, выполняет полный инновационный цикл – от фундаментальных и прикладных исследований до создания высокотехнологичных наукоемких производств по выпуску материалов нового поколения, полуфабрикатов и уникального технологического оборудования. Предприятие основано в 1932 году.

#### ООО «РУСГРАФЕН»



Адрес: г. Москва, ул. Вавилова  
Телефон: +7 926 35 00 682  
E-mail: [info@rusgraphene.ru](mailto:info@rusgraphene.ru)  
Сайт: <https://www.rusgraphene.ru>

Первая российская компания, запустившая производство CVD-графена – высококачественной графеновой пленки толщиной в один атом углерода, получаемого методом химического газофазного осаждения. Компания «Русграфен» также производит графеновые микрочастицы в виде порошка и суспензии, которые активно применяются для улучшения свойств композитных материалов, функциональных покрытий, технических масел, пластмасс, красок, тканей, бетона и т.д.

#### Московский композитный кластер



Адрес: г. Москва, 2-я Бауманская, 5с1  
Телефон: +7 (499) 267-00-63  
E-mail: [mkcluster@emtc.ru](mailto:mkcluster@emtc.ru)  
Сайт: <http://mcc.emtc.ru/>

Российский инновационный промышленный кластер композитной отрасли Центрального федерального округа, образованный в 2014 году для развития отрасли производства полимерных и композиционных материалов.

ОАО «ВИЛС»



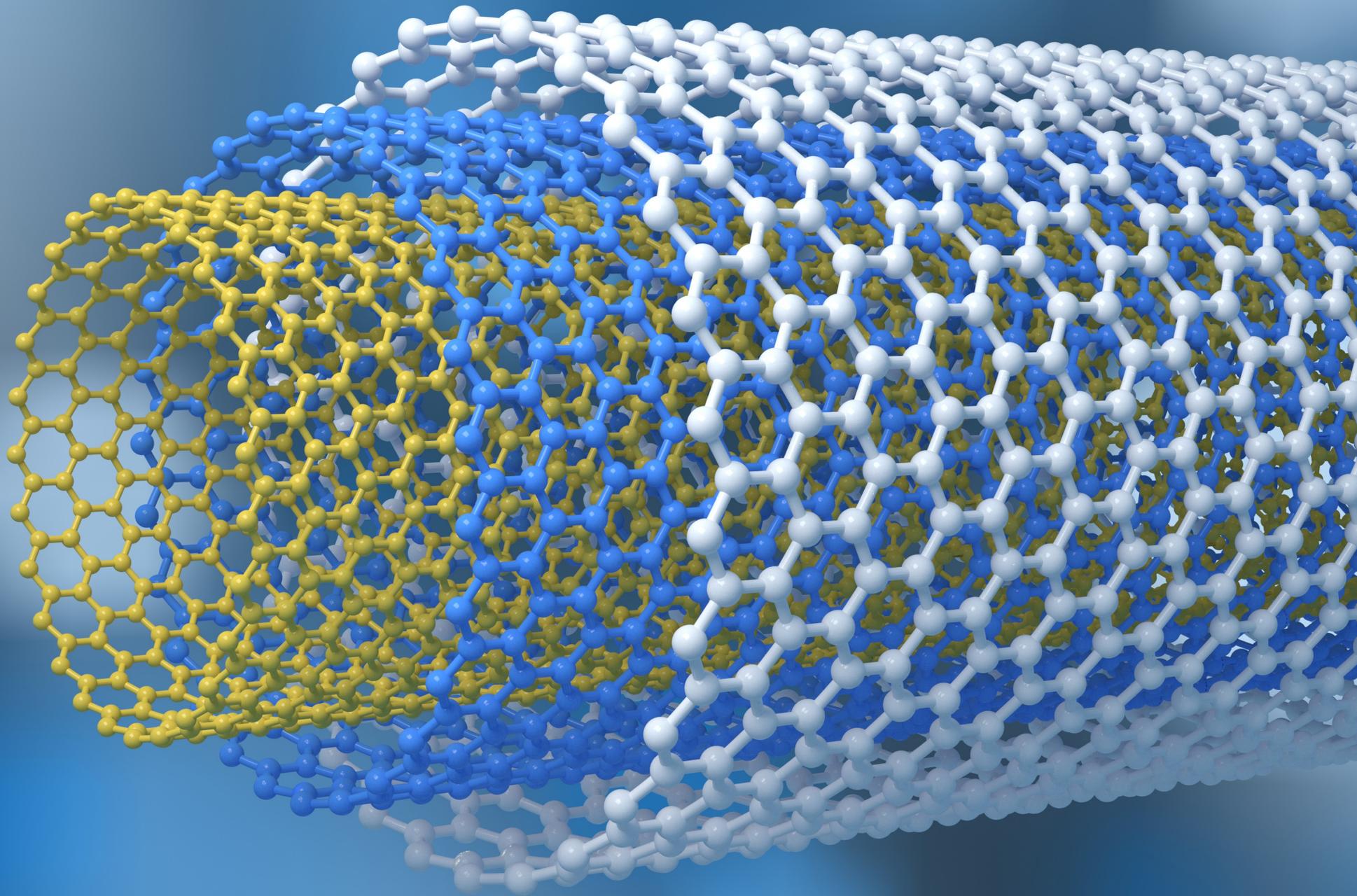
Адрес: г. Москва, ул. Горбунова, 2, стр. 153

Телефон: +7 (495) 287-74-00

E-mail: [info@oaovils.ru](mailto:info@oaovils.ru)

Сайт: <https://www.oaovils.ru/>

Стратегическое предприятие в области создания новых технологий и производства металлургической продукции из специальных сплавов. Предприятие основано в 1929 году.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Создание новых материалов является одной из актуальных задач современного материаловедения. Сегодня процесс создания новых материалов происходит быстрее, чем когда-либо, что связано с ускорением научно-технического прогресса. Под технологическим развитием производства понимается обновление традиционных и технологически отсталых или экологически вредных производственных технологий.

На смену традиционной схеме технологического процесса «материал — заготовка — деталь» пришел новый процесс получения материала с одновременным формированием детали, иными словами произошло совмещение функций технологий и материаловедения.

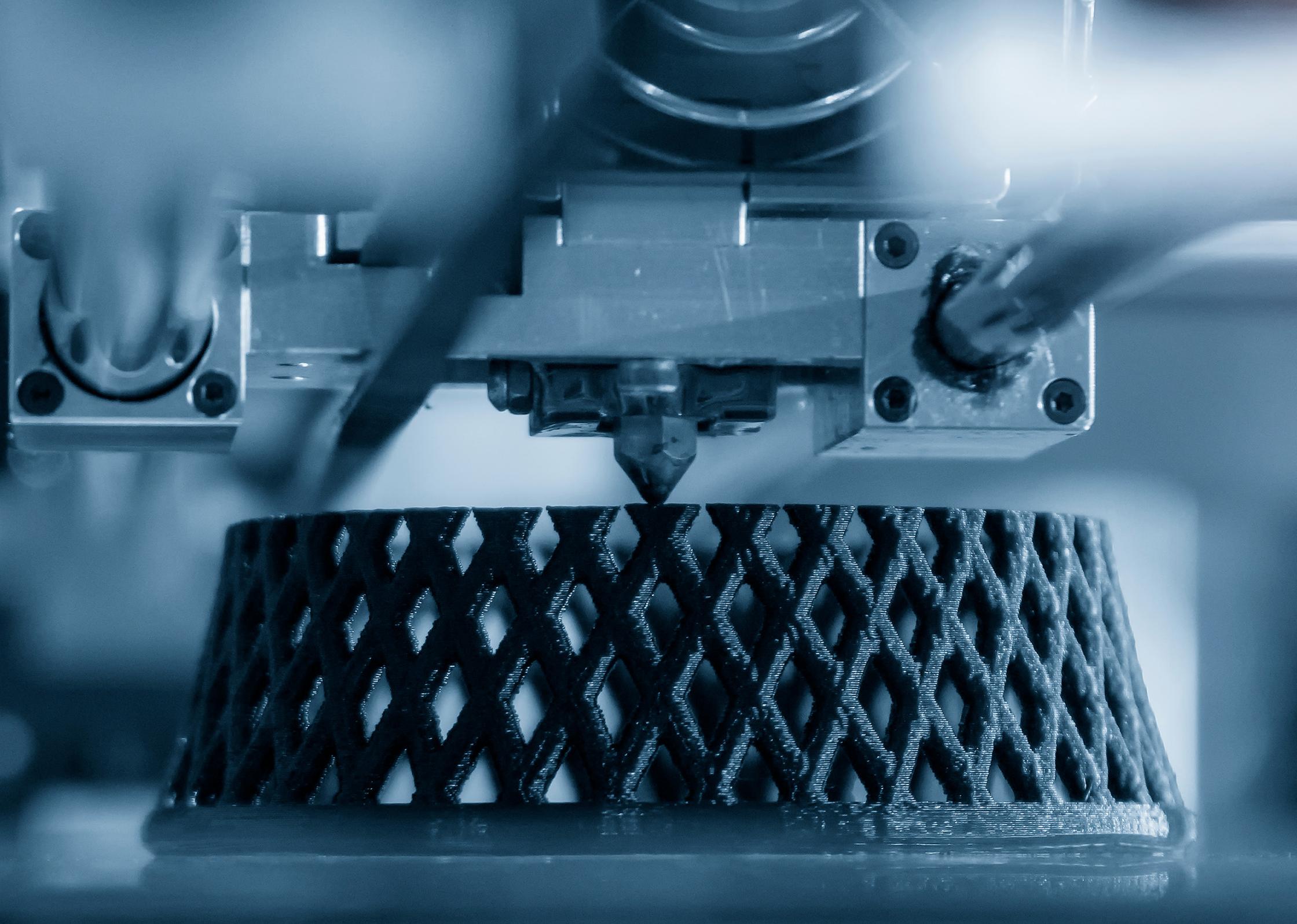
Область материалов для аддитивных технологий развивается активными темпами. Металлические порошки находят новые сферы применения в промышленности. При этом крайне актуальной областью технологического развития становится разработка технологий получения и обработки металлических порошков, применяемых для наиболее высокотехнологичных приложений аддитивных технологий.

Перспективы развития композиционных материалов связаны с развитием двух основных направлений.

Первым является управление материалом не только на макро-, но и на нано- и даже атомарном уровнях, что позволяет создавать материалы с более высокими характеристиками. Второе направление касается совершенствования автоматизированных технологий производства композитных конструкций.

За немногими исключениями, рынок умных материалов и их технологий относительно молод и остается плохо изученным. Большинство современных применений весьма просты или являются производными друг от друга. Но эти материалы найдут более сложное применение, новые реализации и приобретут массовость тогда, когда технологии будут достаточно разработаны.

В России существуют научно-технические заделы в цифровом проектировании новых материалов с заданными свойствами, когда параллельно с процессом проектирования конструкции закладываются свойства, эксплуатационные характеристики и другие требования к материалу, из которого будет изготовлено изделие. Компьютерное проектирование материалов («цифровизация материалов») осуществляется на нано-, микро- и макроуровне.



## ПЕРЕЧЕНЬ ИСТОЧНИКОВ ИНФОРМАЦИИ

1. [http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12\\_december/28/rynki.pdf](http://assets.fea.ru/uploads/fea/news/2019/12_december/28/rynki.pdf)
2. <https://proiz-teh.ru/kompozicionnye-materialy.html>
3. <https://proiz-teh.ru/kp-polimer.html>
4. <https://proiz-teh.ru/kp-metal.html>
5. <https://proiz-teh.ru/keramicheskie-materialy.html>
6. [https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2014/02/Doklad-PPT\\_for-publishing-4.pdf](https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2014/02/Doklad-PPT_for-publishing-4.pdf)
7. <https://studfile.net/preview/5056483/page:29/>
8. <https://worldofmaterials.ru/spravochnik/special-materials/142-intellektualnye-materialy>
9. [https://studme.org/116884/tehnika/dostoinstva\\_nedostatki\\_zagotovok\\_poroshkovyh\\_materialov](https://studme.org/116884/tehnika/dostoinstva_nedostatki_zagotovok_poroshkovyh_materialov)
10. [https://prognoz2030.hse.ru/data/2014/12/25/1103939133/Prognoz\\_2030\\_final.pdf](https://prognoz2030.hse.ru/data/2014/12/25/1103939133/Prognoz_2030_final.pdf)
11. <http://www.promtrader.ru/public/prom-syriyo-materialy/preimushchestva-i-nedostatki-kompozitnyh-materialov.html>
12. <https://www.izron.ru/articles/razvitie-tekhnicheskikh-nauk-v-sovremennom-mire-sbornik-nauchnykh-trudov-po-itogam-mezhdunarodnoy-na-sektsiya-4-mashinostroenie-i-mashinovedenie-spetsialnost-05-02-00/primenenie-kompozitsionnykh-materialov-v-aviatsii/>
13. <https://www.researchgate.net/publication/295919948>
14. [https://www.korabel.ru/news/comments/kompozity\\_v\\_rossiyskom\\_sudostroenii\\_kakovy\\_perspektivy.html](https://www.korabel.ru/news/comments/kompozity_v_rossiyskom_sudostroenii_kakovy_perspektivy.html)
15. УДК 658.51:62.22-419.8:629.463  
ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В СФЕРЕ ГРУЗОВОГО ВАГОНОСТРОЕНИЯ
16. [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1117](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1117)
17. [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=123](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=123)
18. [http://www.cryosystems-mve.ru/dl/Nanotrubki\\_statja.pdf](http://www.cryosystems-mve.ru/dl/Nanotrubki_statja.pdf)
19. [https://www.icmm.ru/images/files/science/collections/mech-etudes/6\\_%D0%A3%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D0%B5\\_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8B\\_%D0%B8\\_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8\\_%D1%84%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0\\_%D0%B8%D0%BB%D0%B8\\_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C.pdf](https://www.icmm.ru/images/files/science/collections/mech-etudes/6_%D0%A3%D0%BC%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%BC%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8B_%D0%B8_%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8_%D1%84%D0%B0%D0%BD%D1%82%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0_%D0%B8%D0%BB%D0%B8_%D1%80%D0%B5%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C.pdf)
20. [https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2014/02/Doklad-PPT\\_for-publishing-4.pdf](https://www.skoltech.ru/app/data/uploads/2014/02/Doklad-PPT_for-publishing-4.pdf)
21. <https://dfnc.ru/yandeks-novosti/primenenie-kompozitnyh-materialov-kak-drajver-otraslej-opk/>
22. <https://www.techcult.ru/technology/5249-beton-s-dobavkoj-grafena>
23. <https://www.techcult.ru/technology/8193-grafen-zashishaet-truby-ot-bakterialnoj-korrozii>
24. <https://www.techcult.ru/technology/3983-pena-s-grafenovoj-armaturoj>
25. <http://naftaros.ru/articles/42/index.html>
26. <https://moluch.ru/archive/126/35133/instrument/materialy-dlya-izgotovleniya-rezhushhego-instrumenta-metallokeramicheskie-tverdye-splavy/>
27. <https://www.tadviser.ru/a/394648>
28. ГОСТ Р 56467-2015
29. <https://mplast.by/encyklopedia/>
30. <https://habr.com/ru/post/365831/>

31. <https://metalgears.ru/baza-znaniy/instrument-oborudovanie-pribory/rezhushchij-instrument/materialy-dlya-izgotovleniya-rezhushhego-instrumenta-metallokeramicheskie-tverdye-splavy/>
32. <https://www.metotech.ru/tvsplavy-opisanie.htm>
33. <https://mash-xxl.info/info/497929/>
34. <http://fccland.ru/dorozhno-stroitelnye-mashiny/250-adaptivnye-materialy-i-intellektualnye-agregaty.html>
35. [https://rusargument.ru/93369\\_v\\_kitae\\_reshili\\_sozdat\\_elektrokary\\_na\\_grafenovyh\\_akkumulyatorah\\_s\\_mgnovennoj\\_zaryadkoj\\_AlexMWA?utm\\_source=yxnews&utm\\_medium=mobile](https://rusargument.ru/93369_v_kitae_reshili_sozdat_elektrokary_na_grafenovyh_akkumulyatorah_s_mgnovennoj_zaryadkoj_AlexMWA?utm_source=yxnews&utm_medium=mobile)
36. [http://viam-works.ru/ru/articles?art\\_id=1422](http://viam-works.ru/ru/articles?art_id=1422)
37. [https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/32908/1/Khinevich\\_Aerogeli.pdf](https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/32908/1/Khinevich_Aerogeli.pdf)
38. <https://pandia.ru/text/77/499/12519.php>
39. Реготов, Г. А. Аэрогель и опыт его применения в мировой ракетно-космической отрасли/Г. А. Реготов. – Текст : непосредственный // Молодой ученый. – 2019. – № 29 (267). – С. 21-24. – URL: <https://moluch.ru/archive/267/61713/> (дата обращения: 25.11.2020).
40. [http://www.ispms.ru/files/Publications/litovchenko\\_1/4\\_Materialy\\_s\\_pamyat\\_u\\_formy.pdf](http://www.ispms.ru/files/Publications/litovchenko_1/4_Materialy_s_pamyat_u_formy.pdf)
41. <https://fb.ru/article/424073/effektyi-pamyati-formyi-materialyi-i-mehanizm-deystviya-vozmognosti-primeniya>
42. <https://extxe.com/14942/materialy-s-jeffektom-pamjati-formy/>
43. [https://expert.ru/russian\\_reporter/2012/26/10-materialov-kotoryie-pomenyayut-mir/](https://expert.ru/russian_reporter/2012/26/10-materialov-kotoryie-pomenyayut-mir/)
44. <https://rcycle.net/plastmassy/biorazlagaemyj-plastik-raznovidnosti-tehnologiya-proizvodstva-osnovnye-svoystva>
45. <https://www.products.pcc.eu/ru/blog/%D0%B1%D0%B8%D0%BE%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B8%D0%BA-%D0%B1%D1%83%D0%B4%D1%83%D1%89%D0%B5%D0%B5-%D0%B8%D0%BD%D0%B4%D1%83%D1%81%D1%82%D1%80%D0%B8%D0%B8-%D0%BF%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82/>
46. <https://kamneteka.com/perovskit-tainstvennyiy-dvigatel-tehnologiy-budushhego/>
47. <https://school-science.ru/5/13/35511>
48. <https://thesaurus.rusnano.com/wiki/article1153>
49. [https://spravochnik.ru/fizika/sverhprovodniki/vysokotemperaturnye\\_sverhprovodniki/](https://spravochnik.ru/fizika/sverhprovodniki/vysokotemperaturnye_sverhprovodniki/)
50. [https://wiki2.org/ru/%D0%92%D1%8B%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F\\_%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C](https://wiki2.org/ru/%D0%92%D1%8B%D1%81%D0%BE%D0%BA%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80%D0%B0%D1%82%D1%83%D1%80%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C)
51. <https://scienceforum.ru/2018/article/2018004590>
52. <http://federalbook.ru/files/OPK/Soderjanie/OPK-6/III/mihaylov.pdf>
53. [https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5\\_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B](https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%B4%D0%BA%D0%BE%D0%B7%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BC%D0%B5%D0%BD%D1%82%D1%8B)
54. <http://www.monazite.ru/recycle/redmet/evropii>
55. <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/47365>
56. <https://www.popmech.ru/technologies/9118-larchik-s-klyuchikom-shkatulka-iz-dnk/>



КОМПЛЕКС ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ПОЛИТИКИ  
И ИМУЩЕСТВЕННО-ЗЕМЕЛЬНЫХ ОТНОШЕНИЙ  
ПРАВИТЕЛЬСТВА МОСКВЫ



ДЕПАРТАМЕНТ ИНВЕСТИЦИОННОЙ  
И ПРОМЫШЛЕННОЙ ПОЛИТИКИ  
ГОРОДА МОСКВЫ

**АПР**

АГЕНТСТВО  
ПРОМЫШЛЕННОГО  
РАЗВИТИЯ МОСКВЫ

Государственное бюджетное учреждение города Москвы  
«Агентство промышленного развития города Москвы» (ГБУ «АПР»)



123995, г. Москва, ул. 1905 года, д. 7, стр. 1



8 (495) 909-30-69



[apr@develop.mos.ru](mailto:apr@develop.mos.ru)



[apr.moscow](http://apr.moscow)