

# Лекция 7

## **ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ (ЖКК)**

**Основные свойства жидких кристаллов**

**Методы получения ЖКК**

**Области применения ЖКК**

## **КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (ККМ)**

**Основные свойства ККМ**

**Методы получения и области применения ККМ**

**ККМ, упрочненные волокнами**

## **УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ (УУКМ)**

**Углеродные волокна**

**Углеродные волокна из полиакрилонитрила**

**Углеродные волокна из пека**

## **ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКИЕ КОМПОЗИТЫ**

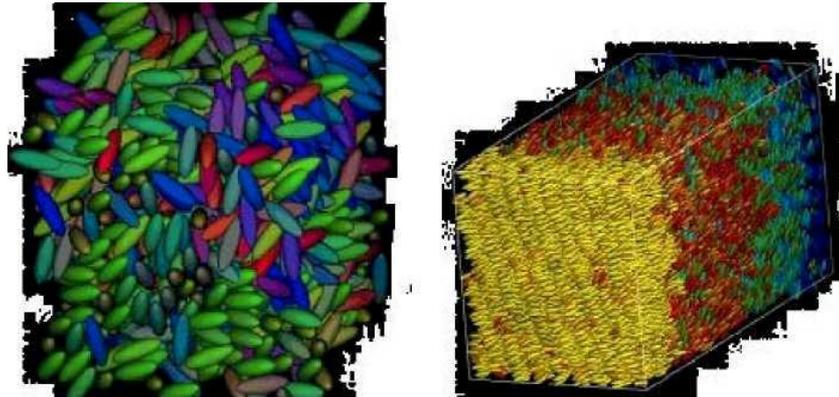
Современные *жидкокристаллические композиты* (ЖКК) представляют собой в основном полимерные пленки, в которые в виде отдельной фазы введены жидкие кристаллы.

Жидкокристаллические композиты созданы ради эксплуатации их уникальных оптических и электрооптических свойств. Последние – это свойства самих, входящих в состав жидкокристаллических композитов, жидких кристаллов, лишь измененные в той или иной степени влиянием матрицы.

Сейчас еще до конца не ясно, все ли физические свойства жидких кристаллов сохраняются в композитах. Те же, которые сохраняются, естественно, несколько изменяются. Это связано с особенностями структуры, которые образуют жидкие кристаллы в ЖКК.

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ

Жидкие кристаллы, основным признаком которых является наличие ориентационного порядка, являются главным рабочим элементом ЖКК. Жидкие кристаллы - это большой класс преимущественно органических соединений. Наличие ориентационного порядка предполагает, что их структурные элементы являются анизометричными, чаще всего вытянутой или дисковидной формы. Ориентационный порядок проявляется в том, что выделенные оси структурных элементов - длинные (для вытянутых) или короткие (для дисковидных) - ориентированы вдоль некоторого направления. Таких направлений в пространстве может быть одно (одномерный порядок), два (двумерный) или три (трехмерный ориентационный порядок).

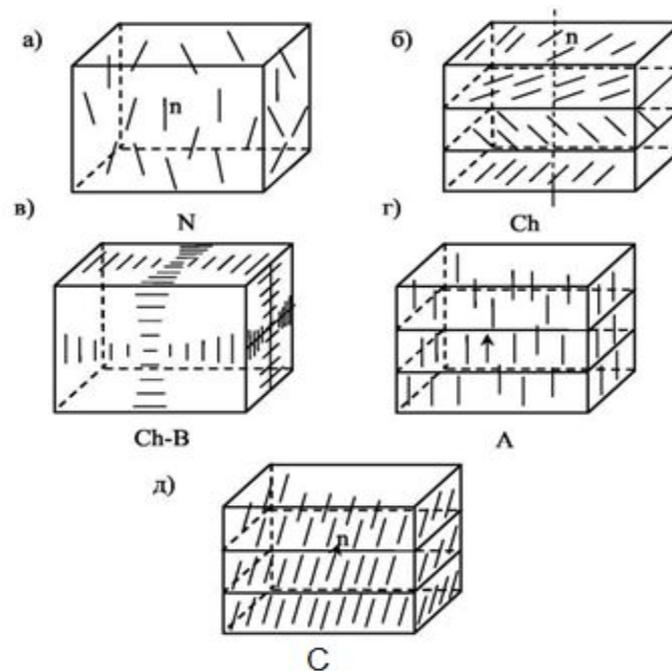


Схематическое представление изотропной среды (жидкость, свойства которой во всех направлениях одинаковы) и анизотропной среды (жидкий кристалл, ориентационное упорядочение).

В зависимости от характера микроскопической упорядочения жидкие кристаллы принято делить на несколько главных типов - *нематические* (нематики), *холестерические* (холестерики) и *смектические* (смектики).

Нематики характеризуются лишь одномерным ориентационным порядком. Выделенные оси структурных элементов ориентированы примерно в одном направлении, а центры тяжести расположены в пространстве хаотично (трансляционный порядок отсутствует). Направление ориентационного упорядочения задается направлением единичного вектора (*директора*).

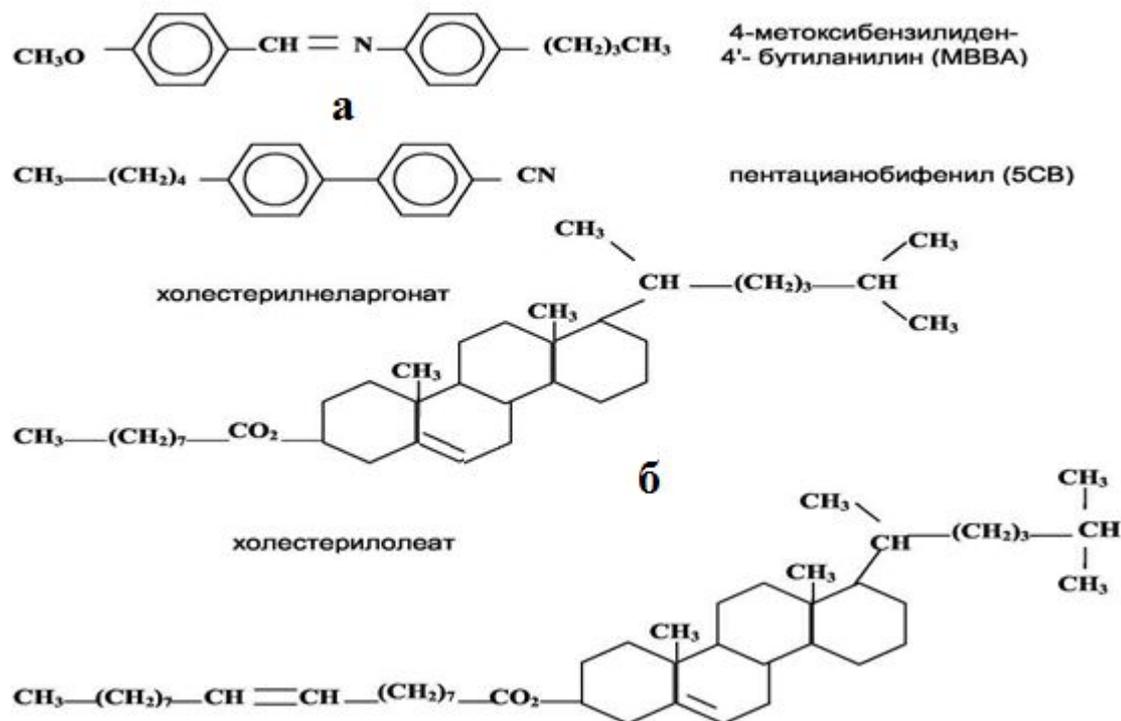
Главные типы жидких кристаллов:  
а - нематический; б - холестерический; в - «голубая фаза», г - смектический (А); д - смектический (С). (чёрточками показаны выделенные оси структурных элементов).



В холестериках есть одномерное трансляционное упорядочение (б). Последнее проявляется в том, что структуры расположены слоями. В пределах каждого слоя порядок чисто нематический, но при переходе от слоя к слою директор поворачивается на небольшой угол. В результате образуется спиральная слоистая структура. Не так давно найдены холестерики с двух- и трехмерным ориентационным упорядочением, называемые «голубыми фазами» (в). Их детальная структура еще неизвестна, но достоверно установлена кубическая упаковка спиральных фрагментов.

Одномерный ориентационный и трансляционный порядок характерен и для смектиков. Однако в этих жидких кристаллах директор, описывающий ориентационный порядок в пределах каждого слоя, не лежит в плоскости слоев. В смектиках А он перпендикулярен слоям (г), в смектиках С наклонен к плоскости слоев (д). Существуют и другие смектики с двумерным трансляционным порядком, но пока они практически не используются в известных ЖКК.

Структурные элементы жидких кристаллов могут иметь различную химическую природу, поэтому мир ЖКК чрезвычайно разнообразен. В качестве структурных элементов могут выступать отдельные молекулы, как изолированные, так и связанные полимерными цепочками. Среди них олигомеры - фрагменты полимерных молекул, ассоциаты молекул, мицеллы (коллоидные частицы) и сложные живые организмы, такие как вирусы. На рисунке приведены несколько химических формул типичных жидких кристаллов.



Химические формулы ряда жидких кристаллов разного типа: а - нематики; б – холестерики

В настоящее время получены композиты почти со всеми типами известных жидких кристаллов. Роль границы контакта жидкий кристалл - твердая поверхность является ключевой в физико-химии ЖКК. Твердая поверхность задает ориентацию директора и тем самым определяет характер протекания всех ориентационных эффектов. Поверхностная энергия прямо влияет на все термодинамические параметры композита, а следовательно вносит существенные коррективы в фундаментальные константы фазовых переходов. Это прежде всего - свободная ориентация жидких кристаллов на поверхности (органической и неорганической), принудительная ориентация (механическими и химическими способами), а также энергетические параметры и соотношения, определяющие ориентационные процессы.

## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ ЖКК

Впервые ЖКК были созданы на базе холестерических кристаллов в 70-е годы для целей термографии. В водный раствор поливинилового спирта (ПВС) при перемешивании добавляли раствор холестерика для образования эмульсии. Испарение воды приводило к затвердеванию пленки ПВС, в порах которой формировалась текстура холестерика. Зачерненная с одной стороны пленка ЖКК обладала свойством выраженного селективного отражения, которое зависело от температуры. На этой основе в дальнейшем были разработаны термоиндикаторы.

В 80-е годы были разработаны композиты с нематиками для применения в электрооптике. ЖКК с нематиками получены на основе полимерной матрицы, в свободных полостях которой находится нематик. Для получения ЖКК как с холестериками, так и с нематиками существуют две основные технологии: 1) эмульгирование с последующим отверждением; 2) фазовое разделение, включающее: получение раствора жидкого кристалла в растворе полимера или пористой матричной среде и последующее отверждение, при котором микрокапли жидкого кристалла отделяются от матрицы в результате полимеризации при охлаждении расплава и испарении растворителя.

Большая часть используемых сейчас ЖКК с нематиками получена на основе полимеров. Такой композит сохраняет все механические свойства полимерной основы, в частности, позволяет использовать его в виде тонких пленок любого размера, что является важным техническим преимуществом.

Морфология таких ЖКК определяется соотношением нематик-полимер. При умеренных концентрациях нематика (60 % масс.) в полимере образуются сферические или эллиптические пустоты (капсулы), которые заполняет нематик. Такую структуру называют структурой «швейцарского сыра». При большей концентрации нематика сам полимер собирается в виде мелких шариков и такую структуру называют структурой «полимерных мячей».

## **ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ЖКК**

Жидкие кристаллы широко используются в различных областях техники. Наиболее массовое их применение - индикаторы и дисплеи. Однако на пути еще более широкого внедрения жидких кристаллов в технику стоят серьезные трудности, связанные с технологией их изготовления. Все электрооптические эффекты жидких кристаллов, используемых в экранах отображения информации, наблюдаются в тонких слоях с определенной структурой. Организация такой структуры связана с процессами ориентации молекул жидкого кристалла между двумя стеклянными подложками, на внутреннюю сторону которых нанесены прозрачные электроды для управления. Высокие требования к качеству стеклянных подложек, длительность процессов ориентации и герметизации не только сужают возможности экранов с точки зрения их размеров, но и делают технологию изготовления таких устройств достаточно сложной. Многие из этих трудностей снимают жидкокристаллические композиты.

Преимущества ЖКК несомненны. Они твердые и гибкие, им можно придать любую форму, их размеры практически не ограничены.

Применение ЖКК с нематиками связано в основном с электрооптическими свойствами жидких кристаллов - способностью изменять пропускание света под действием электрического поля. ЖКК с нематиками являются перспективными материалами для построения различных: устройств отображения информации (просветных и отраженных дисплеев), создания проекционных систем, разработки систем управления световыми потоками (ослабители, модуляторы, ограничители мощности, дефлекторы).

Успешно применяются ЖКК в медицинской диагностике, в создании биоконпозитов, поскольку многие сложные биологически активные молекулы (ДНК) и макроскопические тела (вирусы) могут находиться в жидкокристаллическом состоянии.

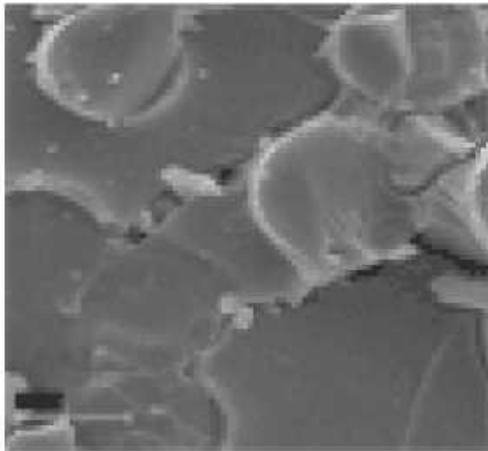
Новые жидкокристаллические композиты разрабатываются весьма активно и области их применения постоянно расширяются.

## **КЕРАМИЧЕСКИЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ**

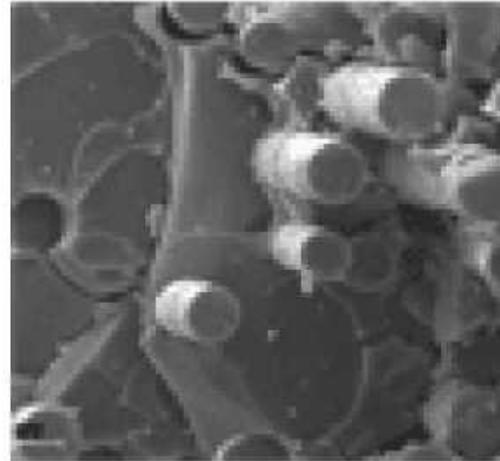
Атомная структура керамических материалов обеспечивает их химическую стойкость к разрушающему воздействию агрессивной окружающей среды, например, растворителей. Поскольку большинство керамических материалов состоит из оксидов, дальнейшее окисление (при горении или других химических реакциях), как правило, невозможно. Керамика - это материал, который «сгорел», «прокорродировал» и, будучи продуктом этих реакций, уже не подвержен разрушению такого типа. Прочность связей между атомами в керамических материалах определяет их высокие температуры плавления, твердость и жёсткость. Природа этих же связей определяет и решающий недостаток керамики - ее хрупкость. Поэтому усилия ученых направлены на устранение таких микроскопических дефектов, как поры, агломераты, химические примеси, которые становятся источниками зарождения трещин. Один из способов достижения этого состоит в тщательной очистке и очень тонком размоле исходного порошка и плотной его упаковке перед спеканием, что приводит к получению керамики с предельно мелкими кристаллическими зёрнами.

## ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ККМ

Высокопрочные композиты на основе керамики получают путем армирования ее волокнистыми наполнителями, а также металлическими и керамическими дисперсными частицами. Армирование непрерывными волокнами позволяет получать ККМ, характеризующиеся повышенной вязкостью, а армирование частицами приводит к резкому возрастанию прочности за счёт создания барьеров на пути движения дислокаций.



Хрупкая керамика SiC/SiC

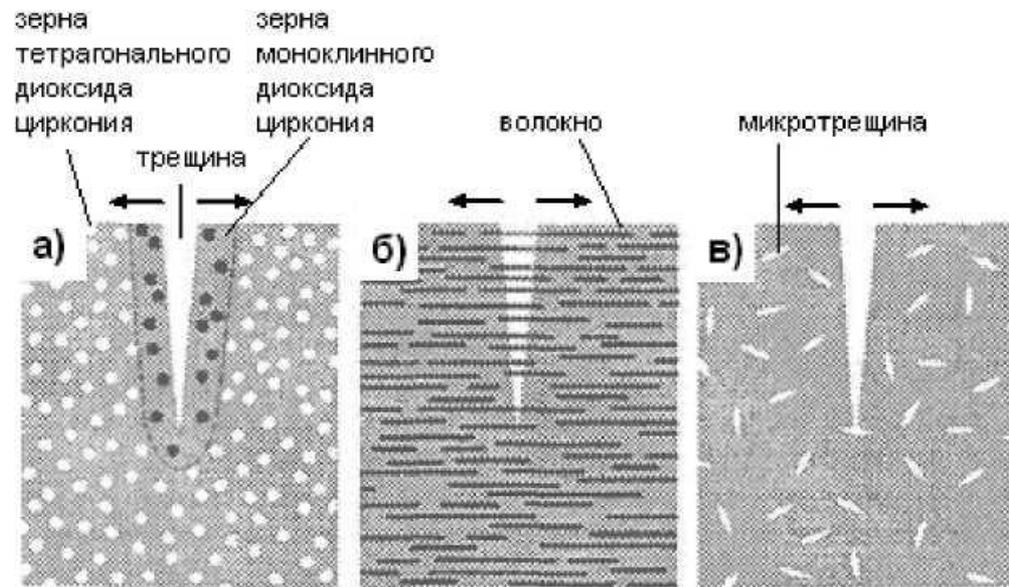


"Вязкая" керамика SiC/ZrO<sub>2</sub>/SiC

Кроме улучшенных методов изготовления керамики, способствующих уменьшению числа дефектов структуры, разрабатываются новые способы упрочнения керамики за счет торможения роста тех трещин, которые возникают при растяжении или сдвиге. Один из таких способов основан на структурном превращении (а), в результате которого повышается вязкость. В нем используется свойство кристалла диоксида циркония  $ZrO_2$  увеличивать свой объем на 3 - 5% и изменять структуру под действием напряжения, возникающего на конце распространяющейся трещины. Трещина, приближаясь к включенным в керамическую матрицу зернам  $ZrO_2$ , вызывает их расширение. Результатом этого расширения является локальное сжатие прилегающей к зерну зоны керамической матрицы. Растущая трещина оказывается сжатой в точке роста, что мешает ее дальнейшему увеличению. Кристаллические зерна  $ZrO_2$  вводят во многие керамические материалы, что значительно повышает их вязкость.

Другой перспективный способ увеличения вязкости заключается во введении в керамическую матрицу тонких переплетенных волокон (б). Армирующие волокна и частицы в ККМ тормозят рост трещин. Растущая трещина, столкнувшись с волокном, может либо отклонить, либо вытолкнуть волокно из матрицы. В обоих случаях поглощается энергия и замедляется рост трещины. Даже при большом количестве возникших трещин матрица в композите разрушается не так легко, как в неармированном материале, поскольку армирующие элементы затрудняют распространение трещин.

Еще один способ повышения вязкости аналогичен способу торможения трещин в стальных пластинах. Он заключается в «затуплении» конца разрушающей макротрещины на большой площади. В случае керамики в процессе ее изготовления с помощью специальной процедуры весь материал пронизывают мельчайшими микротрещинами (микропорами), которые тормозят движение макротрещины (в).



Механизмы упрочнения керамики: а - трансформационное упрочнение; б-армирование волокнами; в - «затупление» трещины на большой площади

Керамическая матрица придает композиту высокую теплостойкость. Боросиликатное стекло, армированное волокнами из карбида кремния сохраняет прочность при 1000°C. Такие матрицы, как карбид кремния, нитрид кремния, оксид алюминия и муллит (сложное соединение алюминия, кремния и кислорода), обеспечивают композитам работоспособность при еще более высоких температурах (1700°C). Между кристаллическими зернами, из которых в основном состоят керамические материалы, имеются стеклообразные области, которые при высоких температурах размягчаются и начинают действовать как элементы, останавливающие рост трещин.

Керамические композиты являются перспективными жаропрочными материалами. Они характеризуются высокой температурой плавления и модулем упругости, низкой плотностью, высокой прочностью на сжатие, химической инертностью и устойчивостью к воздействию агрессивных, в частности окислительных сред, большими запасами сырья. Наряду с этим керамические материалы обладают недостаточной прочностью при растяжении, изгибе, циклическом нагружении, повышенной хрупкостью, низким сопротивлением тепловому удару, низкой ударной вязкостью. Введение в керамику армирующих волокон позволяет в значительной степени устранить перечисленные недостатки и создать композиты, способные работать в окислительной среде при температурах до 2273 К.

## МЕТОДЫ ПОЛУЧЕНИЯ И ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ККМ

Теплостойкость ККМ усложняет их производство. Керамические матрицы имеют широкое применение, но не все они могут быть расплавлены в процессе изготовления, поэтому неармированную керамику обычно производят, спрессовывая частицы керамического порошка при высоких температуре и давлении. Этот процесс называют спеканием. Один из способов производства композита с керамической матрицей является простым видоизменением этого метода, короткие волокна или нитевидные кристаллы («усы») перед спеканием смешивают с керамическим порошком. Если армирование производят длинными волокнами или нитями, то их пропитывают взвесью керамического порошка в жидкости, а затем проводят спекание этих нитей. Композит можно сформировать, спрессовав армирующие нити, пропитанные горячим вязким стеклом.

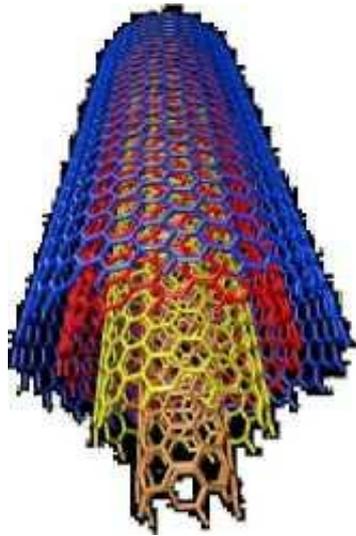
Керамика характеризуется низкой прочностью при растяжении и при высоких температурах одной из причин выхода из строя изделий из керамики является растрескивание. Это создает большие трудности при армировании ее волокнами, поскольку недостаточное удлинение матрицы препятствует передаче нагрузки на волокно. Поэтому волокна должны иметь более высокий модуль упругости, чем матрица. Ассортимент таких волокон ограничен. Обычно используют металлические волокна. При этом сопротивление растяжению растет незначительно, но существенно повышается сопротивление тепловым ударам.

*Среди ККМ, армированных волокнами можно выделить:*

*ККМ с металлическими волокнами.* Керамику армируют волокнами вольфрама, молибдена, стали, ниобия. Основная цель введения в керамику металлических волокон заключается в образовании пластичной сетки, которая способна обеспечить целостность керамики после ее растрескивания и уменьшить вероятность катастрофического разрушения. Металлические волокна не взаимодействуют с оксидной керамикой вплоть до температур 2073-2773 К. Изготавливают такие ККМ методом горячего прессования.

*ККМ с углеродными волокнами.* Взаимодействие углерода с оксидами, карбидами и силицидами происходит при более высоких температурах, чем с металлами, поэтому использование керамики в качестве матриц высокотемпературных композитов с углеродными волокнами весьма перспективно.

*ККМ с волокнами карбида кремния.* При практически равной прочности эти ККМ имеют преимущества перед аналогичными материалами с углеродными волокнами - повышенную стойкость к окислению при высоких температурах и значительно меньшую анизотропию коэффициента термического расширения. В качестве матрицы используют порошки боросиликатного, алюмосиликатного, литиево-силикатного стекла или смеси стекол. Волокна карбида кремния применяют в виде моноволокна или непрерывной пряжи со средним диаметром отдельных волокон 10-12 мкм.



## УГЛЕРОД-УГЛЕРОДНЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ

На основе углеродных волокон делают самый теплостойкий *углерод-углеродный композит* (УУКМ), в котором матрицей, склеивающей углеродные волокна, служит практически чистый углерод.

### Углеродные волокна (УВ)

Как известно, механическая прочность твердых тел определяется силой межатомной связи этого вещества. Для твердого тела механическая прочность и твердость пропорциональны. Из природных тел наибольшую твердость имеет алмаз, в котором имеются прочные межатомные связи углерод-углерод. Вот эти связи и можно использовать для создания высокопрочных волокон.

Связи углерод-углерод имеются не только в алмазе, но и в графите. Последний имеет слоистую структуру. Внутри слоев имеются прочные связи углерод-углерод, а между слоями межатомные связи углерод-углерод слабые, их называют Ван-дер-Ваальсовыми. Если чешуйки графита расположить вдоль волокон, то волокно получится прочнее.

Общепринятая технология производства углеродного волокна основана на термической обработке различных органических волокон. Однако из всех видов исходных волокон наиболее пригодными по технологическим и экономическим параметрам оказались из

- ГТЦ (гидратцеллюлозы),
- ПАН (полиакрилонитрилов),
- пека (нефтяных и угольных смол).

На сегодня они являются основным сырьем для изготовления УВ. УВ, полученные, из ГТЦ, были впервые исследованы еще в 1880 г. Они были использованы Т. Эдисоном в его первом патенте на лампы накаливания. Нить, которая была использована в лампе, получена в результате пиролиза хлопкового гидратцеллюлозного волокна. Нити были очень хрупкими, обладали высокой пористостью, что приводило к неравномерному их нагреву, а при высокой температуре они окислялись.

В последующие 30 лет для преодоления этих недостатков был предложен метод пиролитического нанесения покрытий на волокно (пиролиз - превращение органических соединений с одновременной деструкцией их под действием высокой температуры). Приблизительно в то же время в лампах накаливания стали применять гибкую вольфрамовую проволоку и интерес к углеродным нитям угас и не возрождался до середины 50-х годов XX столетия.

## Принципы получения углеродных волокон

Об использовании полиакрилонитрила (ПАН) для производства УВ было впервые сообщено в 1961 г. Для повышения надмолекулярной ориентации вводилась стадия вытяжки ПАН-волокна. Последующая стабилизация проводилась в атмосфере кислорода (смесь  $\text{Ar} + \text{O}_2$ ). Затем волокно карбонизировалось при температуре 1000-3500°C.

Об использовании пеков при производстве УВ сообщили в 1965 г. Сначала волокна получали в основном формованием из расплавов изотропных пеков или аналогичных дешевых продуктов нефтепереработки. Эти волокна также подвергались окислению с последующей карбонизацией в инертной атмосфере при температуре ~1000°C. Свойства таких изотропных волокон были весьма невысокими.

Новый метод получения УВ из пека осуществлялся по следующей схеме: пек переводился в жидкокристаллическую (мезоморфную) форму перед процессом прядения. Жидкокристаллическое состояние реализовывалось в процессе вытягивания в инертном газе при температуре 400-500°C. Пек, переведенный хотя бы частично в мезоморфную фазу, формовался, подвергался окислению и дальнейшей карбонизации при температуре 1000-3000°C. Волокна, полученные этим способом, обладали достаточно высокой степенью ориентации (анизотропией).

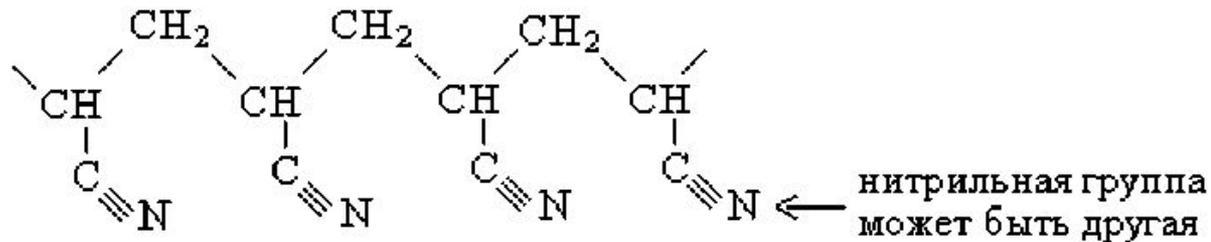
## УВ ИЗ ПОЛИАКРИЛОНИТРИЛА (ПАН)

Процесс переработки ПАН в УВ включает следующие стадии:

- формование исходного ПАН-волокна;
- предварительная вытяжка;
- стабилизация при 220°С на воздухе под натяжением;
- карбонизация при 1500°С в атмосфере инертного газа;
- графитация при 3000°С в атмосфере инертного газа.

## Характеристики ПАН - сополимеров

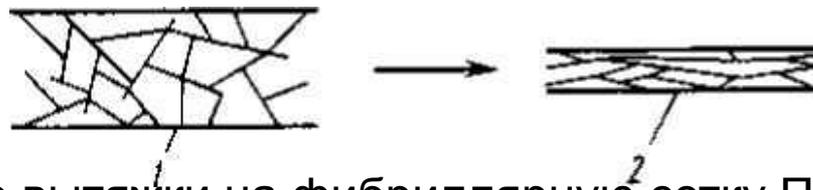
ПАН является линейным полимером, состоящим из углеродной скелетной молекулы с углеродо-азотными боковыми полярными группами.



Строение ПАН полимера

Температура стеклования для ПАН достаточно высока (~120°C), что связано с относительно сильными межмолекулярными взаимодействиями полярных нитрильных групп. Термическая деструкция полимеров акрилонитрила происходит при температурах ниже температуры его плавления. Сильная полярность нитрильных групп определяет низкую растворимость ПАН. Только полярные растворители могут быть использованы для растворения ПАН.

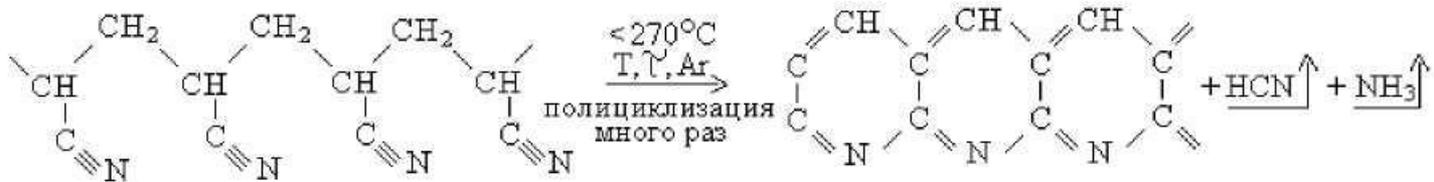
Как сам ПАН, так и его сополимеры формируются в основном по мокрому способу. По этой технологии полимер растворяется, и прядильный раствор, пройдя через фильеру в осадительную ванну, образует волокно. Затем волокно проходит стадию промывки, вытяжки и сушки. Результатом процесса мокрого формования является образование ориентированных структур в волокнах ПАН.



Влияние вытяжки на фибриллярную сетку ПАН-волокна: 1 - исходная фибриллярная сетка; 2 - вытянутое волокно

### Стабилизация ПАН

Для получения хорошего высокопрочного и высокомодульного УВ из ПАН или его сополимеров, необходимо создавать преимущественную ориентацию макромолекул параллельно оси волокна. Затем следует стабилизировать структуру волокна относительно релаксационных процессов, чтобы преимущественная ориентация сохранилась в волокне после карбонизации. Стабилизация полимера должна идти при стекловании и далее при карбонизации ( $T \uparrow$ ) по пути уменьшения гибкости макромолекул ПАН или по пути "связывания" молекул вместе для практически полного исключения релаксационных процессов и возможности дезориентации цепей.



Образование объёмных поперечных связей.

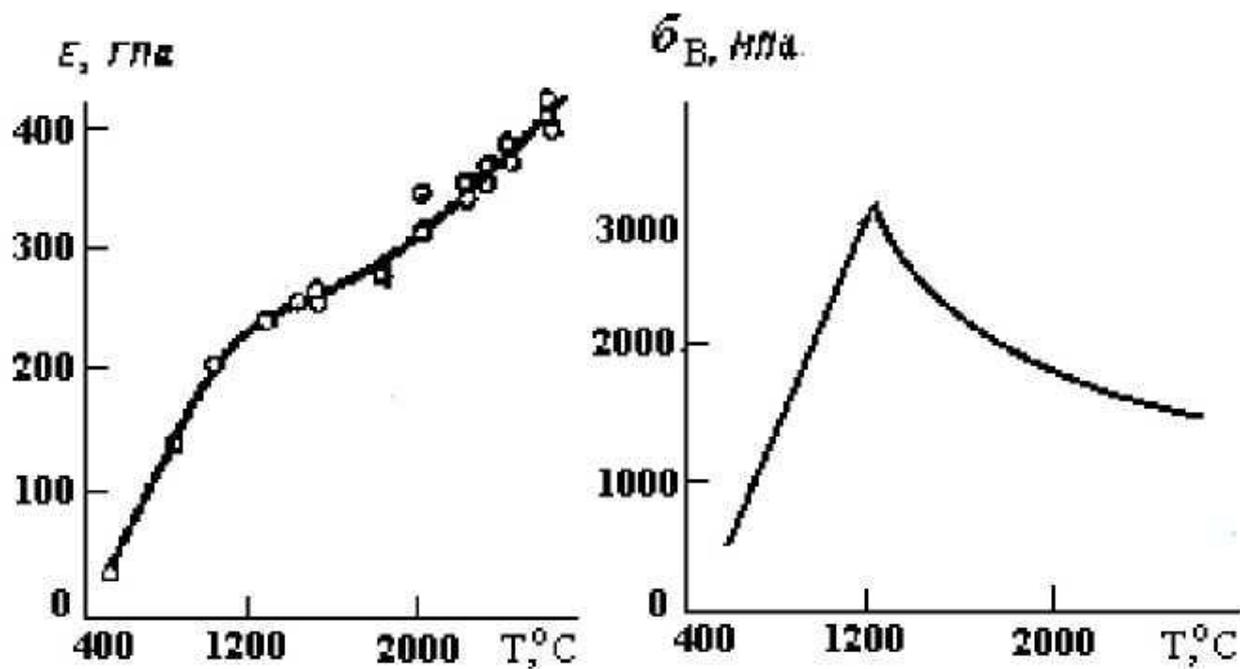
## Карбонизация и графитация

Под карбонизацией понимают обычно процесс пиролиза стабилизированного ПАН-волокна, при котором происходит его превращение в углеродное волокно. Карбонизация проводится в атмосфере инертного газа при температуре 1000-1500°С. При этом из волокна удаляются почти все элементы за исключением углерода. При 1000°С удаляются: метан, цианистый водород, вода,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и ряд углеводов. В волокне при этой температуре остаётся 94%-С и 6% $\text{N}_2$ . Деазотирование наиболее активно происходит при температурах начиная с 600°С и максимум его приходится на температуру 900°С. При обработке ~ 1300°С в материале остается не более 0,3% азота, который играет важную роль в формировании электрических свойств УВ.

Графитация в основном проводится при температурах выше 1800°С. При этом улучшается преимущественная ориентация кристаллов.

В результате термообработки диаметр исходного ПАН-волокна уменьшается почти вдвое. Средний диаметр УВ составляет 7-10 мкм.

Механические свойства УВ на основе ПАН в основном зависят от температуры обработки. Модуль упругости увеличивается с ростом температуры, а предел прочности  $\sigma_e$  проходит через максимум.



Зависимость модуля упругости  $E$  и предела прочности  $\sigma_B$  при растяжении УВ на основе ПАН от температуры термообработки  $T$

## Углеродные волокна из пека

Процесс производства УВ из мезофазных пеков следующий:

- нагревание при 400-450°C в среде инертного газа в течение длительного времени для получения жидкокристаллического (мезофазного) состояния;
- формование волокон из жидкокристаллических пеков;
- отверждение и стабилизация волокон;
- карбонизация волокон ~1400-1700°C;
- графитация волокон ~3000°C.

Если время получения жидкокристаллического состояния уменьшить или ускорить процесс, то механические свойства будут плохие.

Пек и другие сходные с ними материалы являются продуктами деструкции, образующимися при перегонке каменного угля, сырой нефти, натурального асфальта и ряда синтетических компаундов (например, поливинилхлорида (ПВХ)) под воздействием высокой температуры или катализаторов.

Они различаются как по молекулярной массе, так и по степени ароматизации. Насыщенная часть углеводородов включает в основном алифатические соединения с низкой молекулярной массой. Нафтеноароматическая часть пеков состоит из ароматических веществ с низкой молекулярной массой, а также включает насыщенные углеводы циклической структуры.

## **Формование волокна из мезофазных расплавов пеков**

При формовании волокон из мезофазных пеков может быть использована та же технология, что и при получении обычных синтетических волокон. Для этой цели применяется техника формования волокон из расплавов. Исходный материал, содержащий обычно 50-90% мезофазы, помещается в экструдер, нагретый предварительно до соответствующей температуры, а затем расплав формуется методом продавливания через фильеру в атмосферу инертного газа. Обычно скорость формования составляет 127 м/мин и степень фильерной вытяжки выбирается ~ 1000:1. Конечный диаметр волокон составляет 10-15 мкм, но может быть изменен.

В связи с тем, что мезофазные пеки термопластичны, перед карбонизацией проводят их термообработку с целью сшивки пеков. Это необходимо во избежание протекания релаксационных процессов при высоких температурах. Волокна сшиваются в кислородсодержащей атмосфере или при более низких температурах в сильно окисляющихся жидкостях. В результате такой обработки большие блюдцеобразные молекулы, соединенные вместе в мезофазной структуре, сшиваются под влиянием окислительной полимеризации и образуют стабилизированное волокно. Такое волокно уже может быть подвергнуто карбонизации и графитации.