

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 есть 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 являются главным рабочим элементом ЖКК. Поскольку основным признаком жидких кристаллов является наличие ориентационного порядка, естественно, все свойства композитов, так или иначе, определяются степенью их ориентационного упорядочения.

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).

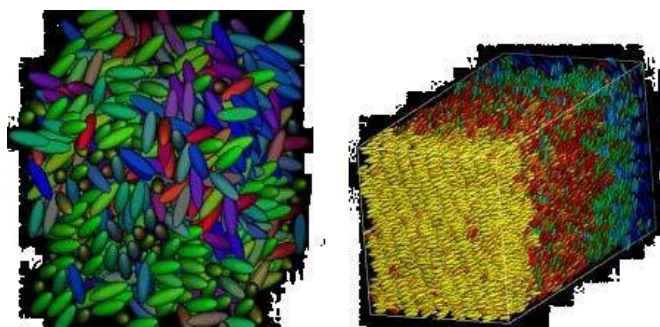


Рис. 1. Схематическое представление (а) изотропной среды (жидкость, свойства которой во всех направлениях одинаковы) и (б) анизотропной среды (жидкий кристалл, ориентационное упорядочение).

Некоторые жидкие кристаллы дополнительно имеют частичный трансляционный порядок. Он не может быть трехмерным, что характерно для твердого кристалла. Но двух- и одномерные трансляционные порядки наблюдаются довольно часто. Характерная особенность структуры жидких кристаллов - их высокая лабильность. Структурные элементы связаны слабыми дисперсионными силами. Поэтому небольшие внешние воздействия (температура, электрические и магнитные поля, механические напряжения) приводят к заметным изменениям в структуре жидких кристаллов и, следовательно, изменяют их физические свойства.

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

Нематики характеризуются лишь одномерным ориентационным порядком (Рис. 2а). Выделенные оси структурных элементов ориентированы примерно в одном направлении, а центры тяжести расположены в пространстве хаотично (трансляционный порядок отсутствует). Направление ориентации одномерного упорядочения - задается направлением единичного вектора (*директора*).

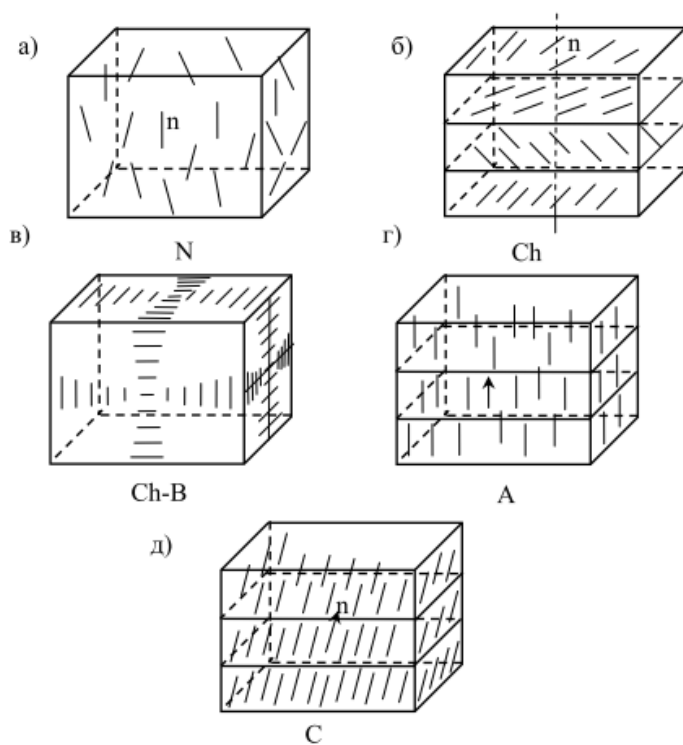


Рис. 2. Главные типы жидких кристаллов: *a* – нематический; *б* - холестерический; *в* - «голубая фаза», *г* - смектический (А); *д* - смектический (С).

(черточками показаны выделенные оси структурных элементов; их длина пропорциональна наклону структурных элементов к плоскости рисунка)

В холестериках ориентационный порядок тоже одномерный, не есть и одномерное трансляционное упорядочение (Рис. 2б). 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". Их детальная структура еще неизвестна, не 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 *A* он перпендикулярен слоям (Рис. 2г), в смектиках *C* наклонен к плоскости слоев (Рис. 2д). Существуют и другие смектики с двумерным трансляционным порядком, но пока они практически не используются в известных ЖКК.

Каждый тип жидкого кристалла образует свои характерные текстуры. Для нематиков - это шлирен-текстура. Такой вид у нее в поляризованном свете. Темные полосы движутся при вращении препарата и указывают участки, где директор совпадает с направлением поляризатора или анализатора. В светлых участках директор ориентирован произвольно, но однородно. Места же где сходятся черные полосы, являются линейными дефектами - дисклинациями, расположенными перпендикулярно плоскости препарата.

Неориентированные холестерики дают конфокальную текстуру, которая состоит из отдельных и связанных между собой сложных образований, называемых конфокальными доменами. Ориентированные холестерики, у которых ось спирали лежит в плоскости образца, имеют в поляризованном свете полосатую структуру вследствие периодичности (с шагом спирали) меняющегося показателя преломления.

Смектики типа *A* дают конфокальную текстуру, но другие типы смектиков могут иметь и более сложные текстуры.

Из сказанного понятно, что физико-химические свойства жидких кристаллов нужно изучать на однородно ориентированных поверхностях, когда точно известна ориентация структурных элементов. Поэтому жидкокристаллические композиты являются чрезвычайно сложными объектами, в которых не всегда точно можно определить, какую структуру имеет входящий в композит жидкий кристалл.

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 рис. 3 приведены несколько химических формул типичных жидких кристаллов.

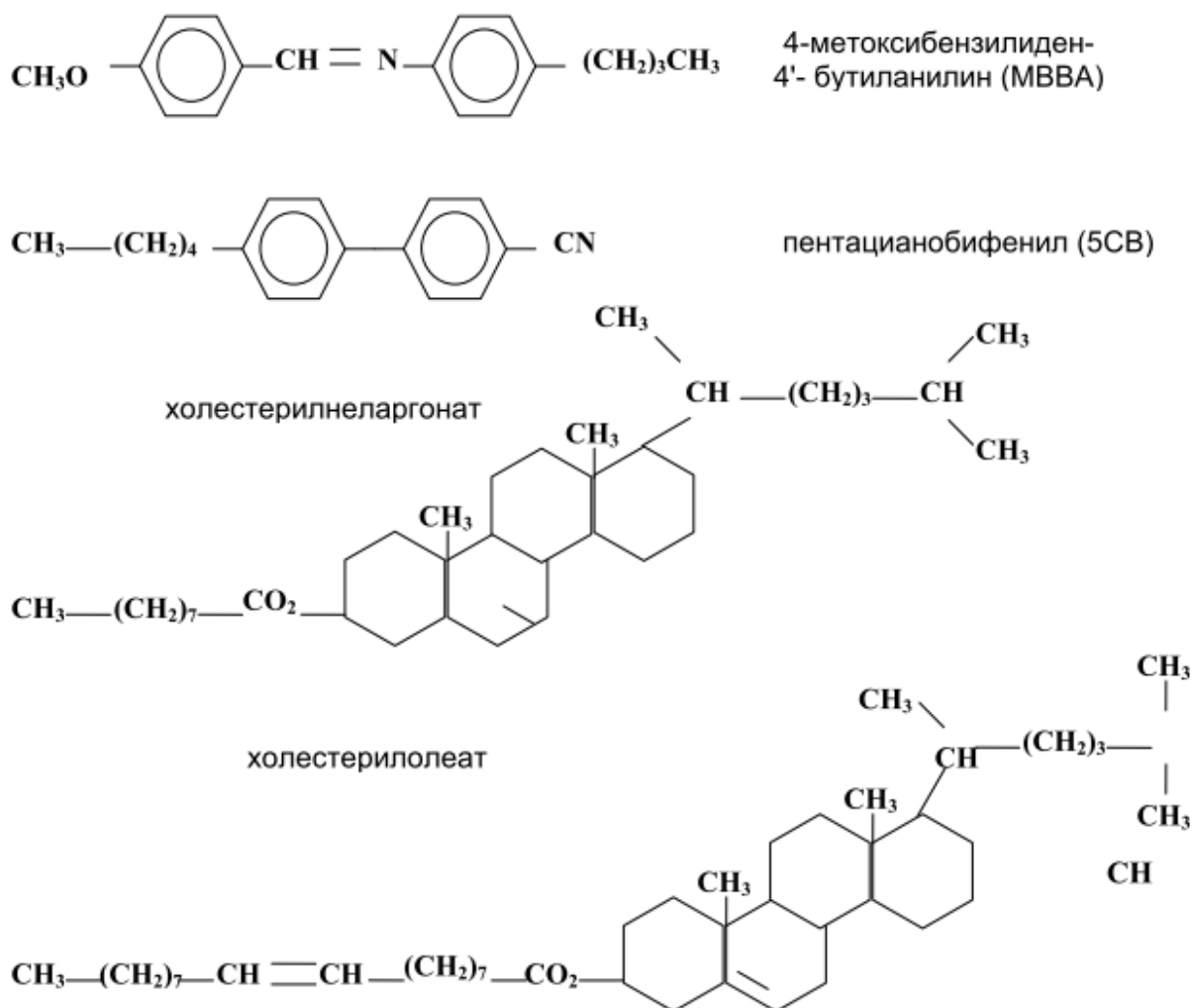


Рис.3.Химические формулы ряда жидких кристаллов разного типа:
 а - нематики; б - холестерики

В настоящее время получены композиты почти со всеми типами известных жидких кристаллов. Роль границы контакта жидкий кристалл - твердая поверхность является ключевой в физикохимии 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.

На поверхности твердых кристаллов ось легкого ориентирования всегда совпадает с одним из атомных рядов с низкими кристаллографическими индексами. Если у поверхности твердого кристалла имеется несколько осей симметрии, то с ними совпадают и несколько осей легкого ориентирования жидкого кристалла, что приводит к сложной ориентации и неоднородной текстуре ЖКК. Для большинства нематиков на твердой поверхности наблюдается планарная ориентация, например на сколах CaF_2 , монокристаллах MgO и др. На аморфном стекле наблюдается как планарная, так и гомеотропная ориентации. Таким образом, ориентация как нематиков, так и холестериков на рельефных поверхностях определяется энергетическими причинами - выигрышем в свободной энергии.

Индивидуальные химические соединения редко используются в ЖКК. Обычно это многокомпонентные смеси, позволяющие путем изменения состава добиваться оптимального сочетания свойств. Составы смесей холестериков для термооптических композитов в большинстве случаев известны. Что же касается составов нематических смесей и методов их получения, то они, как правило, являются секретами фирм и не публикуются.

Методы получения жидкокристаллических композитов

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 планарная 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 отверждение, при котором микрокапли жидкого кристалла отделяются от матрицы

в результате полимеризации при охлаждении расплава и испарении растворителя.

Хорошая эмульсия готовится тщательным перемешиванием компонентов композита с помощью коллоидной мельницы или обычной мешалки (скорость перемешивания 1,5-2 тыс. об/мин, время перемешивания 1-3 мин). При таких параметрах эмульгирования образуется эмульсия с размером капель порядка нескольких микрометров.

В зависимости от способа отверждения принято различать фазовое разделение в результате полимеризации (PIPS - polymerization induced phase separation), охлаждения расплава (TIPS - thermally-induced phase separation) и результате испарения растворителя (SIPS - solvent-induced phase separation).

Ряд современных композитов готовят на основе пористых стекол. Например, пористый SiO₂ (Porasil) с размерами пор от 10 до 150 нм очищали прокаливанием в атмосфере сухого азота при 150°C в течение 1 часа. Затем на поверхность наносили жидкие кристаллы, такие как гептилоксил (PAA4,4), холестеролеат, и нагревали до температуры плавления. Для заполнения пор достаточно было поддерживать температуру в течение 30 мин. Так же готовят ЖКК на основе других пористых стекол и керамик (натриевоборосиликатное стекло и др.).

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 (часто кривизна их поверхности не должна превышать кривизну поверхности земного шара), 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. Особенностью ЖКК является необычный характер деформаций. Деформации сжатия, растяжения, как и во всех жидкостях, очень малы, а деформации сдвига приводят к течению.

Любая функциональная система, механическая или электронная, в процессе работы выделяет тепло. Образуется как бы температурный портрет тела, точно воспроизводящий его функциональное состояние. Спиральная структура холестериков определяет их высокую оптическую активность и способность селективно отражать поляризованный свет, видимого, ИК- и УФ- диапазонов. При изменении температуры, состава среды, напряженности электромагнитного поля изменяется шаг спирали, что сопровождается изменением оптических свойств, в частности, цвета.

Техника применения ЖКК с холестериками сравнительно проста. Первое - необходимо, чтобы изучаемое тепловое поле при нагревании пленки композита не только не выводило ее за пределы холестерической мезофазы, но и оставляло ее в рамках цветотемпературной характеристики, т.е. чтобы наибольшая и наименьшая температуры пленки соответствовали началу и концу области селективного отражения видимого света. Второе - пленка холестерика не должна существенно нарушать тепловое поле, поэтому теплоемкость материала изучаемого объекта должна быть больше теплоемкости пленки. Третье - скорость изменения теплового поля должна быть меньше постоянной времени пленки холестерика. Это время, в зависимости от технологии капсулирования, составляет 0,2-0,3 с, поэтому быстро изменяющиеся тепловые поля с помощью холестерических пленок измерить затруднительно.

Высокая чувствительность ЖКК с холестериками к небольшим изменениям температуры, их способность работать в широком диапазоне температур позволяют использовать их в качестве термоиндикаторов для панорамных измерений полей температур. Если тонкую пленку ЖКК поместить в тепловое поле, которое не перегревает ее и не переводит в изотропную фазу, то по-разному нагретые участки будут иметь разный цвет, если же освещать ее монохроматическим светом (рассматривать через

светофильтр , что тоже самое), то - разную интенсивность. Зная заранее какой температуре соответствует тот или иной цвет (или интенсивность), можно построить изотермическую карту изучаемого теплового поля. Это позволяет измерять температуру тела по изменению цвета жидкого кристалла, контактирующего с поверхностью тела.

Метод жидкокристаллической термографии не является универсальным, однако есть области, где только этот метод может дать быструю и достаточную информацию о поле температур. Это, прежде всего области, где требуется панорамное изображение температур без нарушения исследуемой поверхности, когда исследуемая область настолько мала, что не представляется возможным препарирование ее термодатчиками, сенсорами и другими приборами. К таким областям можно отнести неразрушающий контроль качества различных материалов. Это быстрый и дешевый метод отбраковки изделий электронной техники, выпрямителей, интегральных и печатных плат, транзисторов. ЖКК с холестериками широко используются для визуализации невидимых излучений (контроль ИК - лазеров, визуализация аэродинамического нагрева при изучении перехода от ламинарного течения в турбулентное и др.).

Применение ЖКК с тематиками связано в основном с электрооптическими свойствами жидких кристаллов - способностью изменять пропускание света под действием электрического поля. ЖКК с тематиками 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 и др.).

Успешно применяются ЖКК в медицинской диагностике, в создании биоконструкций, 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

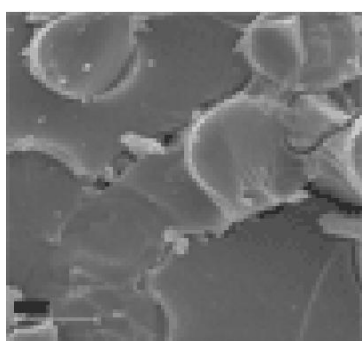
Атомная структура керамических материалов обеспечивает их химическую стойкость к разрушающему воздействию агрессивной окружающей среды, например, растворителей. Поскольку большинство керамических материалов состоит из оксидов, дальнейшее окисление (при горении или других химических реакциях), как правило, 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 жесткость. 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 зернами.

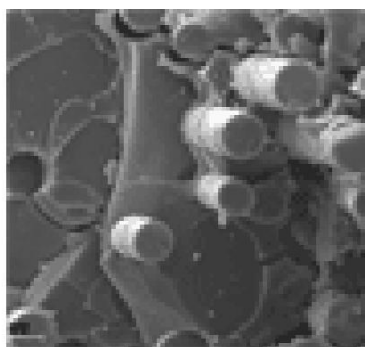
Благодаря хрупкости свойства керамической матрицы отличаются от свойств других типов матриц. В композитах с полимерными и металлическими матрицами основная упрочняющая роль отводится волокнам, а матрица придает материалу ударную вязкость. Керамическая матрица сама по себе достаточно жестка и прочна, но чтобы полностью реализовать ее потенциальные возможности, необходимо увеличить ее ударную вязкость, что достигается путем создания керамических композитов.

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 счет создания барьеров на пути движения дислокаций.



Хрупкая керамика SiC/SiC



"Вязкая" керамика SiC/ZrO₂/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 (рис. 4а), 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 (рис. 4б). 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 (рис. 4в).

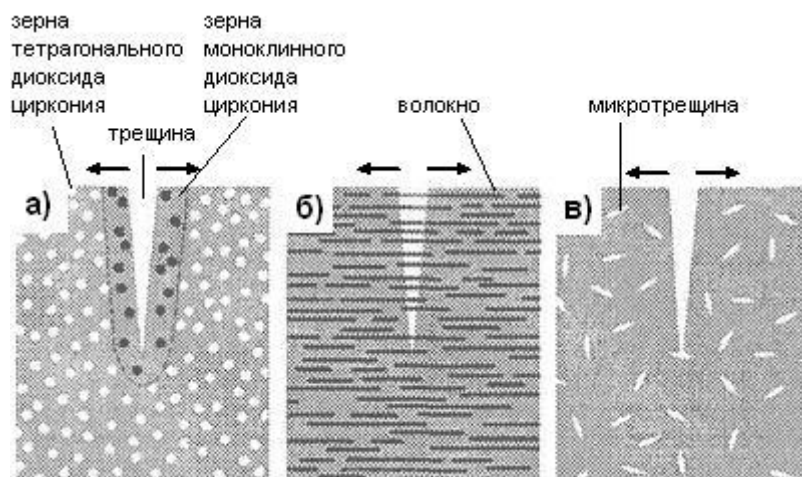


Рис. 4. Механизмы упрочнения керамики: а - трансформационное упрочнение; б-армирование волокнами; в - «затупление» трещины на большой площади

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 высокой 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. Матрицы из стекла допускают применение более традиционного способа изготовления композита, поскольку их можно размягчить. Композит можно сформировать, спрессовав армирующие нити, пропитанные горячим вязким стеклом.

Керамика характеризуется низкой прочностью при растяжении в сочетании с высоким модулем Юнга, низкой ударной вязкостью. 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. В зависимости от соотношения коэффициента термического расширения матрицы и волокна возможны случаи, когда прочность падает.

Материалы такого рода готовят горячим прессованием (таблетирование с последующим спеканием под давлением) или методом шликерного литья, когда волокна заливаются суспензией матричного материала, которая после сушки также подвергается спеканию.

Композиты на основе керамической матрицы получают преимущественно методами порошковой металлургии.

ККМ, упрочненные волокнами.

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 - 2773К. 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.

Из углекерамических композитов наиболее широко используются композиции со стеклянной матрицей (боросиликатное, алюмосиликатное, литиевосиликатное и другие стекла). Углеродные волокна протягивают через суспензию стеклянного порошка в пропанол, режут на слои, которые сушат, укладывают в форму и прессуют в вакууме или аргоне при температуре 1473 - 1573К и давлении 3,5 - 14МПа.

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, литиевосиликатного стекла или смеси стекол. Волокна карбида кремния применяют в виде моноволокна или непрерывной пряжи со средним диаметром отдельных волокон 10 - 12 мкм. ККМ, армированные

моноволокном, получают горячим прессованием слоев из лент волокна и стеклянного порошка в среде аргона при температуре 1423К и давлении 6,9МПа. Керамический композит Si-SiC, получаемый путем пропитки углеродного волокна (в состоянии свободной насыпки или в виде войлока) расплавом кремния, может содержать карбидную фазу в пределах 25 - 90%. Механические характеристики ККМ увеличиваются с ростом содержания SiC. ККМ с волокнами углерода и карбида кремния обладают повышенной вязкостью разрушения, высокой удельной прочностью и жесткостью, малым коэффициентом теплового расширения.

ККМ, упрочненные частицами.

В основе получения композитов с керамической матрицей, упрочненной частицами, лежат процессы изменения фазового состояния в результате образования центров кристаллизации, роста зерен, твердо- и жидкофазного спекания порошков. Для создания нанодисперсных гибридных материалов (CERAMER), таких как металл-керамические, полимер-керамические нанокompозиты применяют современные химические золь-гель-методы.

Гибридные нанокompозиты на основе керамики являются чрезвычайно перспективными материалами. Исходная пористость керамики даже полезна для создания таких композитов. Подобно дисперсным полимер-неорганическим композитам в качестве своеобразных «ловушек» для частиц армирующих элементов выступают оксидные сетки керамики с определенными размерами ячеек (пор). Применяют оксиды кремния и алюминия, стекла, слоистые силикаты и цеолиты -основные составляющие керамики. Особенно интересны цеолиты, для которых хорошо известны методы регулирования размеров пор. Композиты цеолит - металл повышают прочность и твердость мягких металлов, таких например, как алюминий, улучшают их электрические и оптические свойства.

Подбором соответствующих условий термообработки можно регулировать изменения структуры и свойств ККМ в широких пределах. Основные преимущества ККМ связаны с высокими температурами эксплуатации при одновременном значительном повышении прочностных свойств по сравнению с матрицей. Материалы на основе керамических матриц готовят смешиванием компонентов в различных установках с последующим формованием заготовок путем уплотнения, литья и др. Однако важнейшим этапом формирования структуры таких материалов является термическая обработка, часто весьма продолжительная.

Создание новых композиций на основе керамических составляющих постоянно

расширяется. Применения ККМ чрезвычайно обширны и охватывают практически все области современной техники. Можно привести лишь два примера, показывающих большое значение керамических композитов: без создания ККМ на основе ферритовых магнитных сердечников было бы невозможно появление современных быстродействующих компьютеров, а получение ККМ на основе кремниевых оптических волокон позволило разработать экономически выгодные системы телекоммуникаций.