

# Наноцеллюлоза против кевлара

В США получена форма целлюлозы, не уступающая по своим характеристикам самым прочным известным материалам



Целлюлоза — один из многих полимеров, встречающихся в природе

Таблица 1. Свойства различных материалов

Материал	Модуль упругости, ГПа	Прочность на разрыв, ГПа
CNC	150	9,5
Кевлар 49	125	3,5
Углеродное волокно	150	3,5
Углеродные нанотрубки	300	20
Нержавеющая сталь	200	0,5
Дуб	10	0,1

## Биологический полимер

Известно, что целлюлоза является наиболее распространенным биологическим полимером на планете. Она находится в клетках растений и бактерий. Состоящие из длинных цепочек молекул глюкозы, волокна целлюлозы расположены «запутанной» сетью, что обеспечивает структуру и поддержку растительным клеткам.

В качестве промышленного источника сырья для получения целлюлозы используется древесина, которая, по существу, является сетью из целлюлозных волокон, скрепленных матрицами лигнина — другого природного полимера, который легко разлагается и удаляется.

Сам процесс производства целлюлозы заключается в том, чтобы «смыть» лигнин и оставить в воде суспензию целлюлозных волокон. Типичный слой древесной целлюлозы составляет десятки микрон в ширину и около миллиметра в длину.

Целлюлоза в сухой древесине представляет собой пух и пыль с механическими свойствами, напоминающими мокрое бумажное полотенце.

Вряд ли кто-то мог ожидать, что целлюлоза может стать сырьем для получения одного из самых прочных материалов. Ведь из древесной массы производится бумага, не обладающая ни прочностью, ни жесткостью.

## Нанополимер

Если разрушать волокна целлюлозы до нанофибрилл, которые примерно в тысячу раз меньше, чем сами волокна, то можно получить трехмерную сетку неразветвленных длинных нитей молекул целлюлозы, которые удерживаются с помощью водородных связей. Водородные связи между молекулами целлюлозы являются достаточно сильными, чтобы придать прочность и жесткость нанокристаллам целлюлозы.

Из этих нанофибрилл формируются секции, в которых молекулы упорядочены, а целлюлозные цепочки расположены параллельно друг другу. В некоторых из этих областей появляются одиночные нанофибриллы, отделенные аморфной

Рис. 1. Субструктуры несущих микрофибрилл целлюлозы

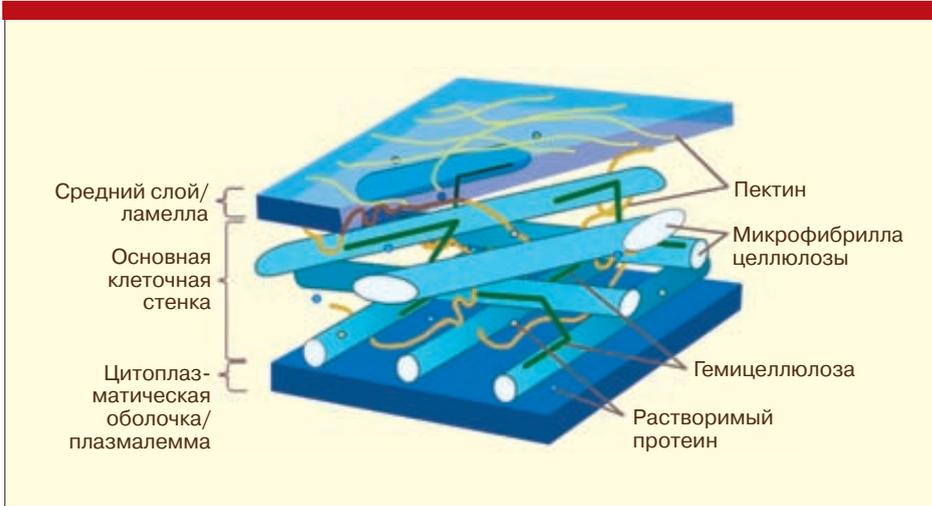


Рис. 2. Микрофотографии целлюлозного волокна из древесной массы

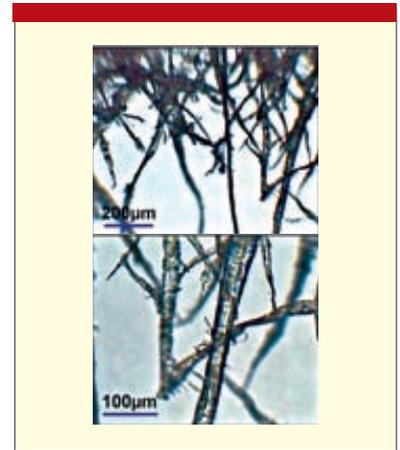


Рис. 3. Разрушение волокон целлюлозы до наночастиц

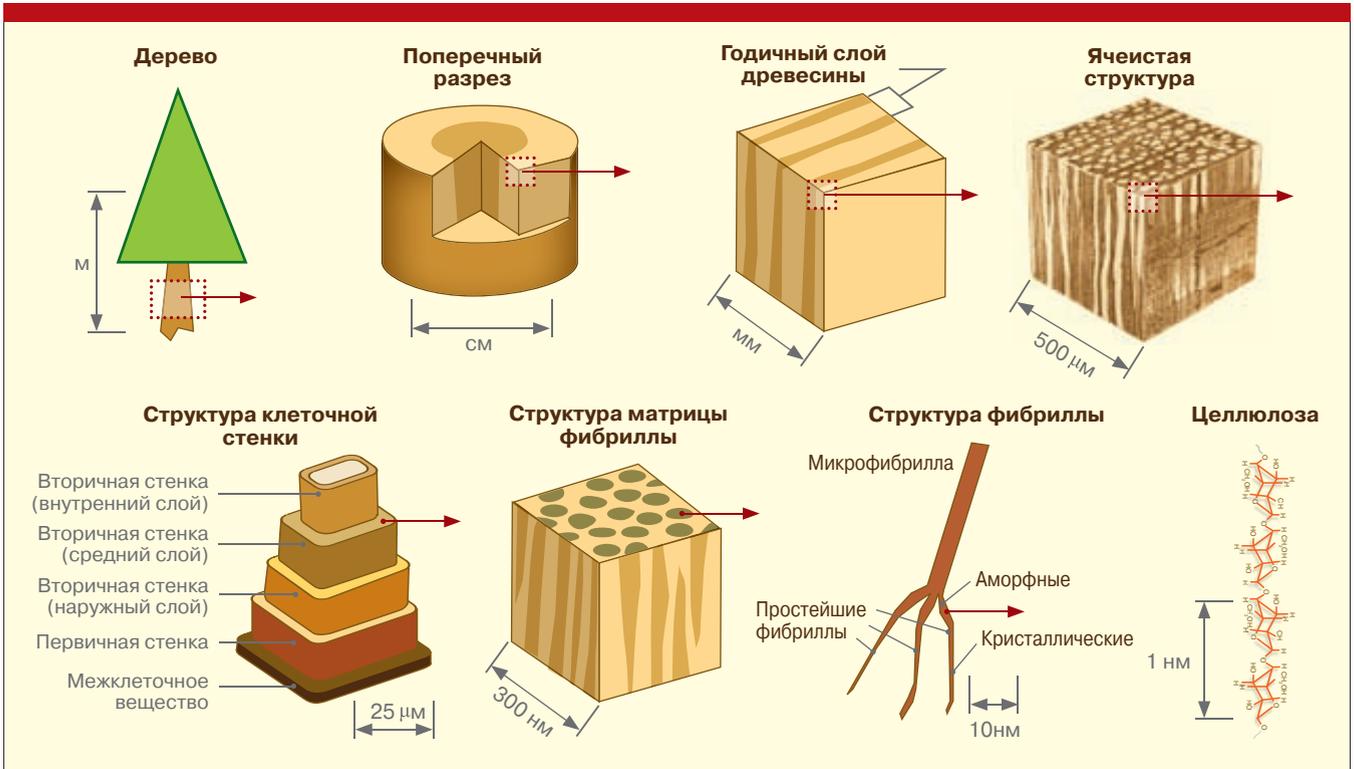


Рис. 4. Целлюлозные волокна и мелкие структуры внутри них



Рис. 5. Сетка неразветвленных длинных нитей молекул целлюлозы

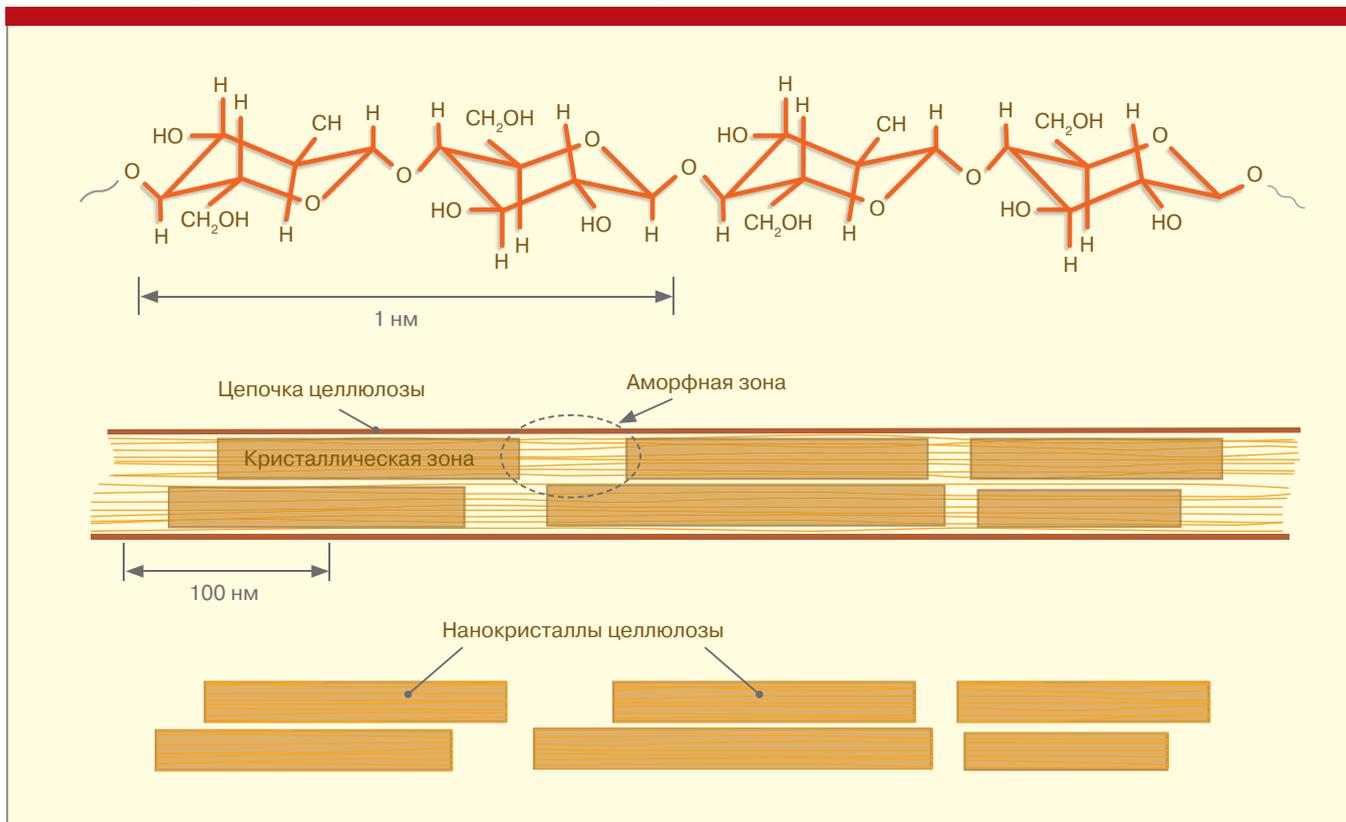


Рис. 6. Структура полимера целлюлозы

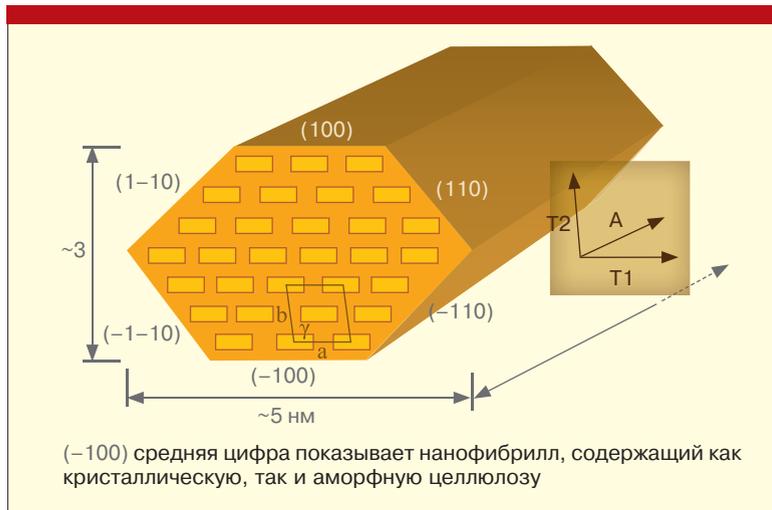


Рис. 7. Нанокристаллы целлюлозы после удаления аморфной целлюлозы путем кислотного гидролиза

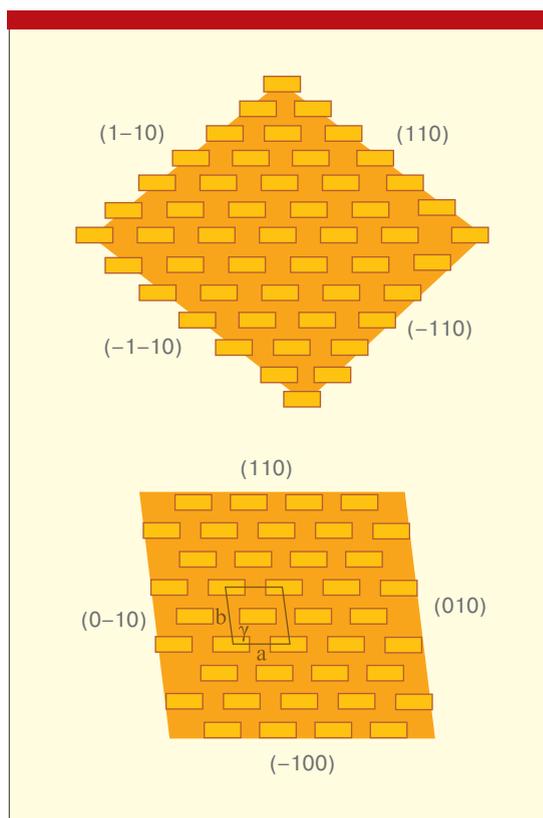
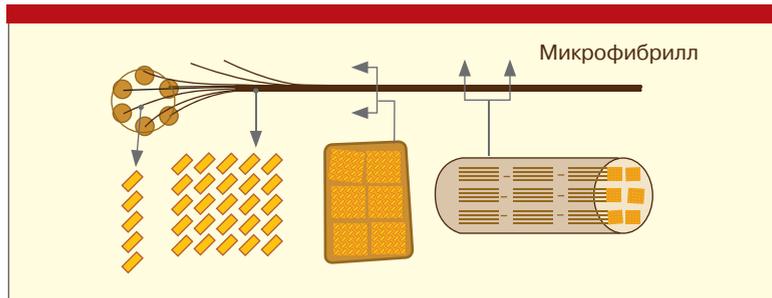


Рис. 8. Поперечное сечение различных типов нанокристаллов



областью, которые не имеют большую степень упорядоченности. Такие индивидуальные нанокристаллы легко удаляются путем растворения аморфных областей с помощью сильных кислот.

## Свойства и применение

В США новый материал из целлюлозы называли CNC. Отделенный от древесины материал, как правило, имеет доли микрона в длину, и представляют собой квадратное сечение со стороны в несколько нанометров. Его объемная плотность находится на низком уровне — 1,6 г/куб. см, но он обладает высокой прочностью: модуль упругости — около 150 ГПа, а прочность на разрыв — до 10 ГПа (см. табл. 1).

Как видно, только один материал сильнее целлюлозных нанокристаллов — углеродные нанотрубки. Нержавеющая сталь идет в сравнение исключительно с традиционными материалами.

CNC прочнее и жестче, чем кевлар, и можно получать изделия более высокой прочности, но малой массы. Эти

составляет около 30 %, что определяет ее стоимость. В перспективе есть возможность увеличения выхода продукта. Однако ограничивающим фактором является соотношение кристаллической и аморфной целлюлозы в исходном материале.

Но и сегодня стоимость наноцеллюлозы на 10 % ниже, чем стоимость кевлара, и в десятки раз ниже, чем цена углеродных нанотрубок. Ближайшей целью ученых является доведение стоимости одного килограмма CNC до 10 долларов. Тогда материал окажется примерно в 100 раз дешевле, чем стоимость углеродных нанотрубок, превосходящих наноцеллюлозу по прочностным характеристикам. Мощное производство должно снизить эту цифру до одного или двух долларов за килограмм.

## Ложка дегтя

Как и большинство материалов, нанокристаллы целлюлозы не являются идеальными. Целлюлоза имеет гидро-

**Стоимость наноцеллюлозы на 10 % ниже, чем кевлара, и в десятки раз ниже, чем цена углеродных нанотрубок.**

качества привлекли внимание военных для использования нового материала в легкой броне и бронированных стеклах (наноцеллюлоза прозрачна). Заинтересовались материалом и компании, работающие в области автомобилестроения, авиастроения, электроники, бытовых товаров и медицинской промышленности.

## Цена вопроса

В настоящее время выход наноцеллюлозы с единицы древесной массы

фильные свойства — впитывает воду. Это и есть проблема, с которой предстоит бороться ученым.

Самое простое решение — не использовать композит там, где он будет подвергаться воздействию воды. Другое решение заключается в изменении свойств поверхности целлюлозы таким образом, чтобы она стала гидрофобной — водоталкивающей. По предварительным данным, это легко сделать, но при этом ухудшатся прочностные свойства CNC. Еще одно решение заключается в выбо-



Опытный завод по производству наноцеллюлозы Лаборатории лесной продукции из Лесной службы США (USDA Forest Service Forest Products Laboratory)

ре матрицы материала, который является гидрофобным, что не особенно трудно сделать с химической точки зрения, однако существуют практические трудности в соединении гидрофильных и гидрофобных материалов. Можно просто заключить CNC в какой-то материал, не пропускающий воду.

Какой бы вариант не выбрали ученые, в США уже приступили к производству нанокристаллической целлюлозы из древесных отходов — щепы и опилок. Лаборатория лесной продукции из Лесной службы США открыла опытный завод стоимостью 1,7 млн долларов. ■



Биополимерная пленка из наноцеллюлозы



Гель из наноцеллюлозы