

*Дэвид Н. Рудо,
президент компании «Риббонд»
(г. Сиэтл, США)*

Как оценить прочность стекловолокна

HOW TO EVALUATE STRENGTH FOR DENTAL FIBER REINFORCEMENTS

Резюме

Как мы оцениваем прочность стоматологического материала? Маркетологи используют слово «прочность», чтобы продать материалы, но чаще всего употребление этого термина является ошибочным и не соответствует прогнозируемому клиническому результату. Известный ученый в области материаловедения профессор Дж.Э. Гордон писал в своей книге «Новая наука о прочности материалов», что сопротивление на излом — это фактор, который, как правило, является более важным, чем прочность на изгиб или модуль упругости при изгибе. Именно он определяет структурный успех материала. Эта статья описывает, как оценить сопротивление на излом волокна для армирования.

Ключевые
слова

определение уровня сопротивления на излом в армирующем волокне, сопротивление на излом, поглощение энергии.

Abstract

How do we evaluate strength for a dental material? Marketers use the word «strength» to sell materials, but more often than not, their use of the term strength is misleading and lacks relevance for predicting clinical success. The famous material scientist Professor J.E. Gordon wrote in his book *The New Science of Strong Materials* that fracture toughness tends to be more important for determining structural success than flexural strength of flexural modulus. This document describes how to evaluate the fracture toughness of a fiber reinforcement material.

Key words

defining fracture toughness for fiber reinforcements, fracture toughness, energy absorption.

Один из ведущих мировых ученых в области материалов, Дж.Э. Гордон, писал в своей книге «Новая наука о прочности материалов»: «Самый большой минус в строительном материале — нехватка прочности или жесткости, хотя это очень востребованные свойства, а недостаточная ударная прочность, то есть отсутствие сопротивления распространению трещин». Другими словами, материалы ломаются не из-за недостаточной прочности на изгиб или жесткости, а из-за отсутствия изломостойкости.

Следует с осторожностью прогнозировать клинические характеристики материала, основываясь лишь на данных его тестирования на прочность, так как существует много различных видов прочности. Если мы хотим оперировать данными об определенном виде прочности, при прогнозе клинических характеристик материала необходимо сначала выяснить, как именно этот вид прочности влияет на клинический эффект. Чтобы определить интересующий нас вид прочности, следует определить клиническую проблему.

При оценке прочности материала в стоматологической отрасли традиционно полагались на показатели прочности на изгиб и модуль упругости при изгибании. Однако, по мнению Дж.Э. Гордона, определенный вид поломок происходит не из-за недостатка прочности на изгиб, а из-за отсутствия изломостойкости. Таким образом, если материал ломается, то его слабым звеном является низкое сопротивление на излом, а не низкая прочность на изгиб. Исходя из этого: должны ли мы в первую очередь проверять материал на изломостойкость, а не на прочность на изгиб? В представленной статье описывается, как оценить сопротивление стекловолокна на излом. В заключение описаны преимущества материала Риббонд Ультра/Ribbond-Ultra над Риббонд Ориджинал/Ribbond Original и Риббонд ТиЭйчЭм/Ribbond-TNM.

На графике 1 показаны четырехточечные результаты теста, определяющего связь между напряжением и деформацией неармированного композита, композита, армированного волокном Риббонд Ультра, и композита, армированного волокном Риббонд ТиЭйчЭм. Стоматологи, вероятно, не привыкли видеть такие графики, как этот, с «зубчатыми» кривыми. Графики кривых Риббонд Ультра и Риббонд ТиЭйчЭм демонстрируют частоту изломов, а именно, те

случаи, когда трещина начинается и проходит на небольшое расстояние, но останавливается благодаря уникальным узловым пересечениям волокна перевивочного плетения, которое запатентовал Риббонд. Эксплуатационные характеристики образцов армированного волокна, представленные в данном исследовании, специфичны для продуктов Риббонд именно с перевивочным плетением. Стекловолокно и кварцевое волокно будут неэффективными в предотвращении распространения трещин и проявят себя как более хрупкий материал.

Стоматологи привыкли видеть кривую «напряжение — деформация» в том виде, в каком она представлена зеленым цветом на диаграмме. Это стандартная кривая для хрупкого материала, которым в данном случае является неармированный фотополимерный композит. Кривая идет равномерно вверх и потом резко изгибается под прямым углом. Это указывает на то, что трещина возникает в хрупком композите, потом достигает своей критической длины и затем стремительно распространяется, что приводит к катастрофической поломке материала.

Лабораторное тестирование модуля упругости при изгибе волокна

Жесткие материалы часто оказываются достаточно хрупкими. Стекло, как в объемной форме, так и в виде волокна, — хороший пример материала, который является жестким, но хрупким. Армированное стекловолокно демонстрирует относительно высокий модуль упругости при изгибе при тестировании в лабораторных условиях, однако при использовании армированного стекловолокна для построения конструкции проявляется его сопротивление на излом, которое, скорее всего, приведет к повреждению материала.

Как и все инженеры-конструкторы, Дж.Э. Гордон знал, что гораздо легче разработать прочную структуру, используя эластичные материалы, чем создавать структуру, которая имеет изломостойкость, используя при этом жесткие материалы. Жесткость может быть создана путем размещения эластичных волокон таким образом, чтобы сформировать многослойную волокно-композитную структуру. Примером многослойного волокнистого композит-

График 1. Кривые Риббонд Ультра, Риббонд ТиЭйчЭм и неармированного композита подобны до нагрузки силы изгиба в 30 Н

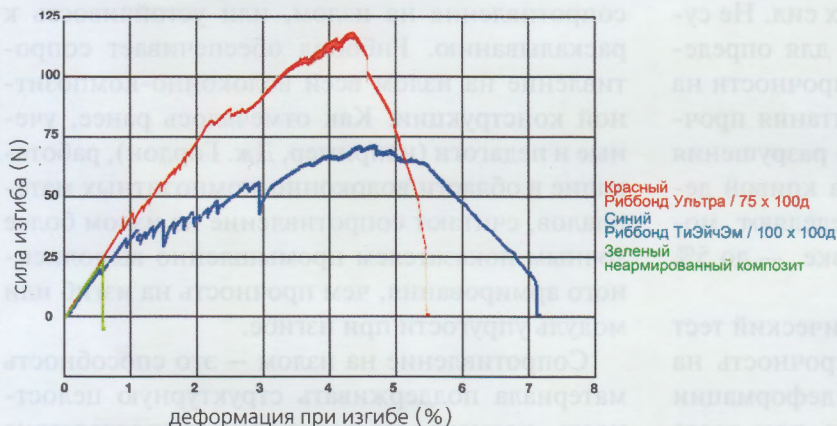
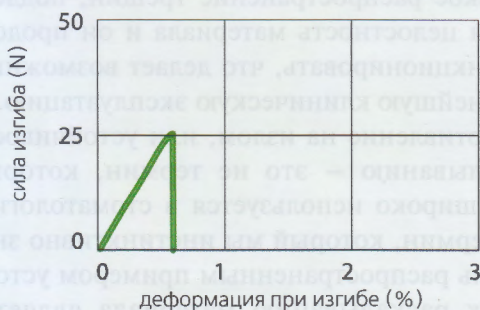


График 2. Неармированный композит



ного материала является плотное приклеивание волокна к поверхности зубов. Чем плотнее волокна прилегают к тканям зуба, тем тоньше будет клеевой шов и тем лучше будет эффект ламинирования. Еще один вариант — использование многослойных волокон при восстановлении включенных дефектов челюстей адгезивными конструкциями на волоконно-композитной балке.

При тестировании материалов на прочность в лабораторных условиях не всегда можно просчитать, как эти материалы проявят себя в клинических условиях при построении конструкций. В процессе армирования волокном пластичность волокна позволяет повторять геометрию сложных контуров, что дает возможность выполнять эффективные восстановления с эффектом ламинирования. Использование материалов с меньшей пластичностью приведет к большому объему клеевого шва, что ухудшит эффективную структуру восстановления. Мы утверждаем, что стекловолокна имеют больше «памяти», чем волокно Риббонд, и, следовательно, с их помощью невозможно создать такие качественные ламинированные структуры, какие можно выполнить с Риббонд.

Предельная прочность на изгиб

Прочность на изгиб — это предельное напряжение, которое способен выдержать материал при его разрушении от изгибающих сил. Не существует универсального правила для определения критической точки в тесте прочности на изгиб. Например, некоторые испытания прочности на изгиб определяют начало разрушения с момента появления «скачков» на кривой деформации. Другие протоколы определяют момент разрушения в пиковой нагрузке — до 5% деформации тестового образца.

Если традиционный стоматологический тест прочности на изгиб определяет прочность на изгиб как момент, когда кривая деформации показывает первые колебания, то при тесте прочности на изгиб испытываемого армирующего волокна Риббонд Ультра первое падение кривой будет зарегистрировано приблизительно на уровне 32 Ньютона (Н). Это падение кривой деформации связано с моментом появления первых трещин в материале. Однако гораздо большее значение имеет то, что происходит после возникновения этих трещин. Эти протоколы традиционных испытаний прочности на изгиб не демонстрируют окончательную картину. Как показывает график 3, тестовые образцы

Риббонд Ультра продолжают хорошо функционировать после проявления первичного растрескивания вплоть до пиковой нагрузки примерно в 120 Н.



Прочность на изгиб материала Риббонд Ультра достигла своего пика нагрузки при 120 Н и деформации при изгибе 4,4%.

Деформация при изгибе в 4,4% находится в пределах допустимого диапазона деформации, при которой большинство людей считают протез все еще функциональным — при надлежащем уровне его обслуживания.

Сопротивление на излом

Тестовые образцы армированного волокна Риббонд продолжают выполнять свои функции даже после возникновения нескольких трещин — благодаря своей прочности, известной как сопротивление на излом, или устойчивость к раскалыванию. Риббонд обеспечивает сопротивление на излом всей волоконно-композитной конструкции. Как отмечалось ранее, ученые и педагоги (например, Дж. Гордон), работающие в области волоконно-композитных материалов, считают сопротивление на излом более точным показателем промышленно выполненного армирования, чем прочность на изгиб или модуль упругости при изгибе.

Сопротивление на излом — это способность материала поддерживать структурную целостность, несмотря на повреждения впоследствии растрескивания. Когда останавливается катастрофическое распространение трещин, поддерживается целостность материала и он продолжает функционировать, что делает возможным его дальнейшую клиническую эксплуатацию.

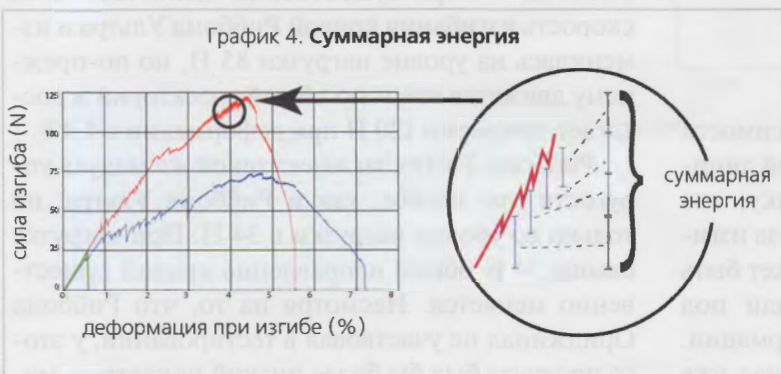
Сопротивление на излом, или устойчивость к раскалыванию — это не термин, который обычно широко используется в стоматологии, но это термин, который мы инстинктивно знаем. Очень распространенным примером устойчивого к раскалыванию материала является

древесина. В древесине есть множество трещин, но их наличие, как правило, не приводит к полному разрушению этого материала. Другим примером материала, устойчивого к раскалыванию, являются ткани зуба. Зачастую зубы имеют множественные трещины, тем не менее, их существование не означает, что они обязательно распространятся по всему объему зуба и он будет полностью разрушен.

Поглощение энергии

Устойчивый к разрушениям материал способен выдерживать повреждения и не распадаться полностью. Для того чтобы вызвать дальнейшее распространение трещин, требуется все больше и больше энергии. Такое сопротивление на излом отражено на графике зубчатыми колебаниями на кривой, которая демонстрирует уровень сопротивления на излом во время тестирования образцов армированного волокна Риббонд. Каждое новое растрескивание требует энергии, и каждое колебание вверх на кривой, представленной на графике 4, демонстрирует энергию, которая поглощается материалом перед новым растрескиванием. Единичные трещины купированы и остановлены на уровне жестких узловых переплетений волокна Риббонд.

Если мы рассмотрим пик кривой по Риббонд Ультра, то увидим скупенность таких моментов растрескивания. Количество энергии, которая в результате приводит к разрушению материала, отражено не на пике кривой (примерно 120 Ньютонов). На самом деле это суммарная энергия, которая измеряется совокупностью длин всех поступательных колебаний кривой вверх. Традиционные протоколы испытаний прочности на изгиб не фиксируют этот феномен совокупной энергии при тестировании армированного волокна на ударную вязкость.



Работа разрушения

Важным критерием в материаловедении является работа разрушения. Работа разрушения — это

количество энергии, которое требуется для разрушения материала. Площадь под кривой «напряжение — деформация» представляет собой количество энергии, необходимое для разрушения материала. На графике 5 можно увидеть, что для разрушения образцов армированного волокна Риббонд Ультра требуется гораздо больше работы разрушения (общая площадь под кривой), чем для неармированных композитных образцов.

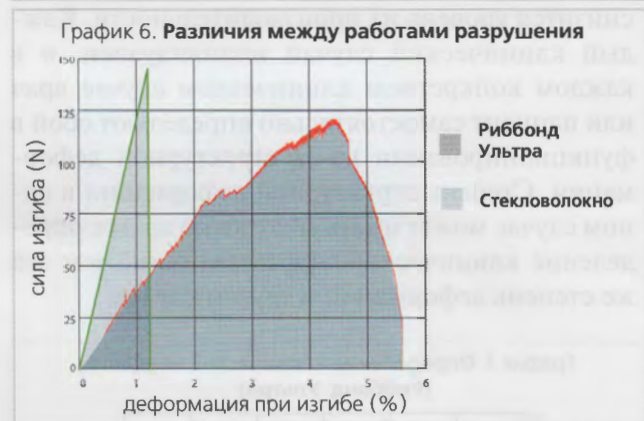
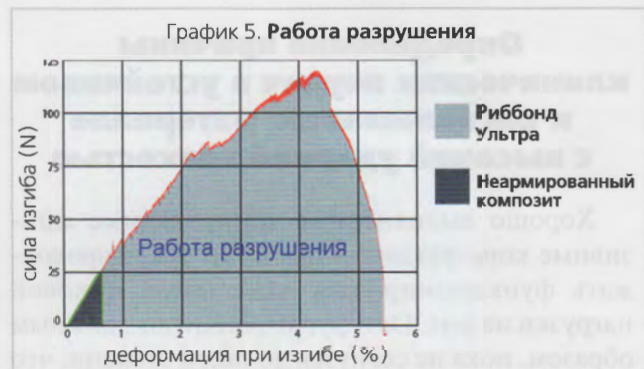


График 6 позволяет сравнить типичную кривую прочности на изгиб у армированного стекловолокна с однонаправленными волокнами и кривую прочности на изгиб у Риббонд Ультра. В сравнении с неармированным композитом стекловолокно увеличивает прочность на изгиб и может даже увеличить модуль упругости при изгибе. Укрепление стекловолокном, возможно, дает большую прочность на изгиб, чем Риббонд Ультра. Однако как и в работе с хрупким материалом, если стекловолокно хоть немного повреждается, то разрушается полностью.

Как видно на графике 6, материал может иметь более высокую прочность на изгиб и, возможно, также более высокий модуль упругости при изгибе, чем другой материал, но эти более высокие показатели данных видов прочности не являются залогом успешного построения конструкции. Общая площадь под кривой Риббонд Ультра намного больше, чем общая площадь под типич-

ной кривой стекловолокна с однонаправленными волокнами, это указывает на то, что Риббонд Ультра был бы более стойким к поломкам. Дж. Гордон, вероятно, сказал бы, что в этом случае материал с более низкой прочностью на изгиб (Риббонд Ультра) будет демонстрировать более длительный клинический эффект, чем армированное стекловолокно, поскольку он более стойкий к поломкам.

Определение причины клинических неудач в устойчивом к раскалыванию материале с высокой ударной вязкостью

Хорошо выполненные армированные адгезивные конструкции и накладки будут продолжать функционировать даже после пиковой нагрузки на них. Они функционируют должным образом, пока не согнутся до такой степени, что снизится уровень их производительности. Каждый клинический случай индивидуален, и в каждом конкретном клиническом случае врач или пациент самостоятельно определяют сбой в функционировании из-за структурной деформации. Степень структурной деформации в одном случае может иметь абсолютно другое определение клинической эффективности, чем эта же степень деформации в другом случае.

График 7. Определение клинической неудачи (Риббонд Ультра)

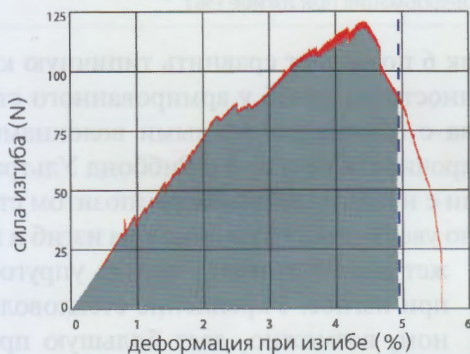


График 7 демонстрирует кривые зависимости деформации от напряжения за пунктирной линией, указывающие гипотетическую точку, где конструкция выйдет из эксплуатации из-за изгиба. В этот момент работа разрушения может быть определена измерением общей площади под конкретной кривой напряжения — деформации. Возможно, устойчивый к расколу материал уже достиг своей максимальной нагрузки, но при этом он все еще может быть в клинической эксплуатации — даже при превышении максимально допустимой нагрузки. Традиционные протоколы тестов на изгиб не учитывают этого явления.

График 8. Определение клинической неудачи (Риббонд ТиЭйчЭм)

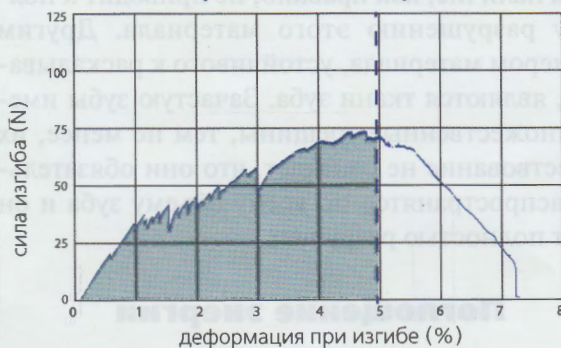


График 8 показывает работу разрушения (общая площадь под кривой) в Риббонд ТиЭйчЭм.

Преимущества Риббонд Ультра над Риббонд ТиЭйчЭм и Риббонд Ориджинал

Хотя специалисты по волоконному композиту считают ударную вязкость более важной характеристикой материала, чем прочность на изгиб и модуль упругости при изгибе, это не означает, что последние характеристики не важны.

Модуль упругости при изгибе является мерой жесткости, что означает сопротивление материала на изгиб или, если сформулировать это иначе, — его скорость изгибания.

Риббонд Ультра сочетает в себе одновременно прочность и сопротивление на излом. Траектория кривой Риббонд Ультра лежит практически по прямой и параллельна аналогичной кривой хрупкого, неармированного композита.

Это указывает на то, что его модуль упругости при изгибе является таким же, как и у образцов неармированного композита. Неармированный композит растрескивается при нагрузке в 30 Н. Кривая Риббонд Ультра при такой нагрузке остается относительно прямой, пока нагрузка не достигает 85 Н, после этого скорость изгиба кривой Риббонд Ультра существенно меняется. Хотя скорость изгибания кривой Риббонд Ультра и изменилась на уровне нагрузки 85 Н, но по-прежнему движется вверх по общей траектории и достигает примерно 120 Н при деформации в 4,4%.

Риббонд ТиЭйчЭм имеет такой же модуль упругости при изгибе, как и Риббонд Ультра, но только до уровня нагрузки в 34 Н. При нагрузке свыше 34 Н общее направление кривой существенно меняется. Несмотря на то, что Риббонд Ориджинал не участвовал в тестировании, у этого продукта был бы более низкий показатель модуля упругости при изгибе и показатель прочности на изгиб. Как и другие продукты Риббонд, Риббонд Ориджинал показал бы значительно более высокие значения ударной вязкости, чем неармированные тестовые образцы.

График 9. Модуль упругости/Жесткость(Риббонд Ультра)

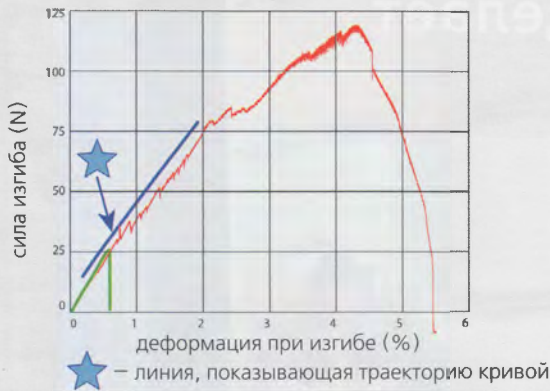


График 10. Модуль упругости/Жесткость (Риббонд ТиЭйчЭм)



Риббонд Ультра имеет более высокий модуль упругости при изгибе, чем Риббонд ТиЭйчЭм и Риббонд Ориджинал. Пиковая нагрузка у Риббонд Ультра намного выше, чем у Риббонд ТиЭйчЭм и у Риббонд Ориджинал. Немаловажно и то, что если мы измерим общую площадь под кривыми при пиковых нагрузках, то увидим, что у Риббонд Ультра эта площадь намного больше, чем у других образцов. Этот фактор свиде-

тельствует также о более высоком показателе работы на разрушение. У Риббонда Ультра есть и другие преимущества. Он тоньше и удобнее для пациента, а также имеет лучшие характеристики пластичности. Хороший уровень пластичности материала позволяет более четко повторять контуры зубов, а это дает возможность сделать более тонкий клеевой шов и получить лучший эффект ламинирования.

Литература

1. James Edward Gordon, The new Science of Strong Materials, Princeton University Press, 1968.
2. David N. Rudo, DDS, and Vistasp Karbhari, ME, PhD, Physical Behavior Of Fiber Reinforcement As Applied To Tooth Stabilization, Dental Clinics Of North America, Volume 43, Number 1, January 1999.
3. Howard Strassler, DMD, and Vistasp Karbhari, ME, PhD, Effect Of Fiber Architecture On Flexural Characteristics And Fracture Toughness of Fiber-Reinforced Dental Composites, Dental Materials, 2006.
4. Dr. David Rudo's personal correspondences with Professor Vistasp Karbhari ME, PhD 1997-2006 —In 2006 Vistasp Karbhari was professor of material science, structural engineering, University of California, San Diego. He is currently the president of the University of Texas - at Arlington.