

УДК 541.64:539.3

## ВЛИЯНИЕ ИЗВИТОСТИ ВОЛОКОН НА РАСТЯГИВАЮЩЕЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПРИ УДАРЕ

© 1998 г. С. Л. Баженов

Институт химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук  
117334 Москва, ул. Косягина, 4

Поступила в редакцию 26.02.98 г.

Принята в печать 08.06.98 г.

Теоретически проанализировано влияние извитости волокон в ткани на растягивающее напряжение, появляющееся при ударе по волокну. При скорости удара ниже некоторого критического значения в волокне возникают продольная и трансверсальная волны. Продольная волна распрямляет и растягивает волокно, а затем за фронтом растяжения бежит поперечная волна треугольной формы с вершиной в точке удара. При превышении критической скорости удара волокно разрушается в момент удара. Извитость волокон приводит к увеличению критической скорости удара. Если деформация распрямления волокна намного ниже его упругой деформации, то извитость волокон приводит к малым поправкам к напряжению и скорости движения волн. Если деформация распрямления волокна превышает упругую деформацию, то изменяется вид решений для растягивающего напряжения и скоростей продольной и поперечной волн. Напряжение растет пропорционально квадрату скорости удара, а скорость продольной волны пропорциональна скорости удара.

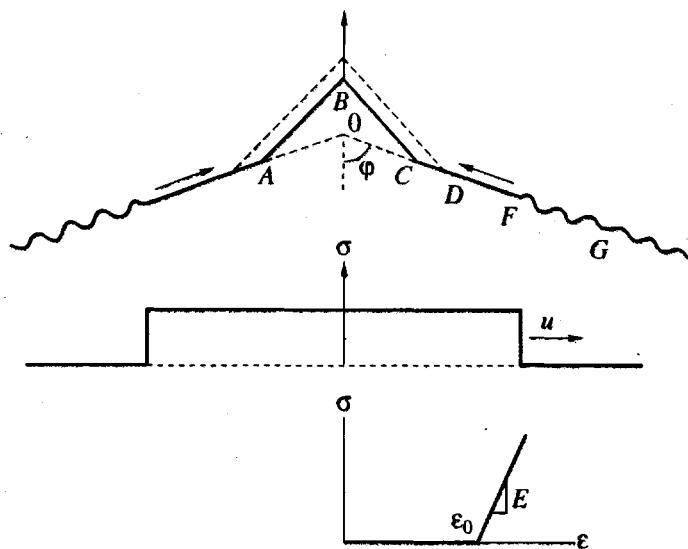
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время высокопрочные органические волокна, например найлоновые, полиэтиловые и арамидные (СВМ, Армос и Кевлар-49) широко применяются в тех случаях, когда требуются повышенные ударные характеристики материала. Волокна используются в сочетании с полимерной матрицей для получения композиционного материала или отдельно в виде ткани. Уникально высокие ударные характеристики органических волокон обусловлены комбинацией высокой продольной прочности волокон и пластичности в трансверсальном направлении. Такое сочетание свойств типично лишь для ориентированных органических волокон. Например, высокую прочность имеет и сталь, однако при скоростном ударе стальная проволока разрушается хрупко, образуя множество мельчайших осколков, из-за отсутствия трансверсальной пластичности. Аналогично разрушаются при ударе и стеклянные волокна. Таким образом, несмотря на кажущуюся общность, проблема поперечного удара по волокну является специфически полимерной задачей.

Трансверсальный удар по волокну исследовался в классических работах Рахматулина [1] и Smith с соавторами [2, 3]. При ударе в волокне

возникают две волны – продольная и трансверсальная. Продольная волна распространяется вдоль волокна со скоростью звука и приводит к однородному растяжению волокна. Для волокон СВМ скорость продольной волны равна ~9 км/с [4]. За фронтом продольной волны растяжения вдоль направления удара движется трансверсальная волна, приводящая к характерной треугольной форме волокна с вершиной в точке удара [1–3]. При распространении поперечной волны увеличивается размер треугольника при постоянном значении его углов. Скорость поперечной волны составляет ~1 км/с, т.е. в 10 раз ниже скорости продольной волны.

При повышении скорости удара растягивающее напряжение возрастает по степенному закону  $v^{4/3}$  [2, 3], и при некоторой критической скорости напряжение достигает предела прочности волокна. В связи с этим описанное выше возникновение двух волн наблюдается лишь при не слишком высоких скоростях удара, когда растягивающее напряжение за фронтом продольной волны ниже предела прочности волокна. Напротив, при скоростях выше критической ударник “перерубает” волокно в момент удара, и продольная волна растяжения не распространяется вдоль



**Рис. 1.** Модель удара. Штриховыми линиями показаны форма волокна до удара и изменение его формы во времени. Средняя часть рисунка иллюстрирует распределение растягивающего напряжения по длине волокна. Внизу показана диаграмма удлинения извитого волокна при растяжении. Пояснения в тексте.

волокна. Поскольку при этом перестает тратиться энергия на растяжение волокна, диссипация энергии резко падает. Для нити волокон СВМ критическая скорость удара, определенная экспериментально, составляет 670 м/с [5].

Следует отметить, что это значение скорости типично для стрелкового оружия. Например, скорость пули пистолетов Макарова и Вальтера равна 310–320 м/с, пистолетов ТТ, парабеллума, УЗИ и Магнума – 410–425 м/с, автоматов Калашникова – 730 (АКМ) и 880 (АК-74) м/с. Таким образом, критическая скорость удара при современном уровне прочности волокон находится в интервале скоростей пуль стрелкового оружия. По этой причине исследование возможности увеличения критической скорости удара весьма актуально.

Структура тканей Армос полотняного плетения исследовалась в работе [6]. Было обнаружено, что нити в ткани извиты, причем нити основы извиты гораздо сильнее, чем нити утка. Механическое нагружение нитей в ткани сопровождалось распрямлением извитой нити. Для ткани Армос, содержащей 14 нитей основы и 11 нитей утка на 1 см<sup>2</sup> ткани, деформация распрямления нитей основы составляла 8.2%, а нитей утка – лишь 0.24% [6].

Цель настоящей работы – анализ влияния извитости волокон в ткани на растягивающее напряжение за фронтом продольной волны и соответственно на критическую скорость удара.

## АНАЛИЗ

Будем искать напряжения, появляющиеся в гибком извитом волокне, имеющем форму угла, как показано на рис. 1. Предполагается, что волокно покоялось и в момент времени  $t = 0$  вершина угла начала двигаться со скоростью  $v$ . Поведение волокна описывается моделью, изображенной на рис. 1, которая основана на результатах скоростного фотографирования удара под прямым углом ( $\phi = 90^\circ$ ) по прямому волокну [1–3]. Проведенный в настоящей работе компьютерный расчет движения волнообразно изогнутой цепочки шариков, соединенных упругими пружинами, показал, что извитость цепочки не изменяет характер ее движения. В расчетах рассматривалась цепочка шариков, имеющая форму угла  $2\phi$ , центральный шар которой в начальный момент времени начинает двигаться с постоянной скоростью  $v$  вдоль оси симметрии. Основное отличие от поведения прямого волокна при трансверсальном ударе здесь состоит в том, что продольная волна не только растягивает, но и распрямляет цепочку.

Таким образом, при ударе волокно ведет себя следующим образом. Появляется волна, бегущая вдоль волокна от точки удара, распрямляя и растягивая волокно. Перед фронтом продольной волны (рис. 1, область  $FG$ ) волокно извito и находится в состоянии покоя. Напряжения в извитой части волокна нулевые. Граница между извитой и распрямленной частями волокна (точка  $F$ ) движется с постоянной скоростью (скоростью продольной волны)  $v$ . Сзади фронта продольной

волны напряжение растяжения постоянно и равно  $\sigma$ . Помимо продольной волны, от точки удара по растянутой части волокна бежит поперечная волна в форме треугольника ( $ABC$ ). Фронт поперечной волны, точка  $C$ , удаляется от точки удара с постоянной скоростью  $w$ , и углы треугольника  $ABC$  с течением времени не изменяются. Область  $ABC$  движется вместе с пулей вдоль направления удара с постоянной скоростью, равной скорости пули. Распрямленная часть волокна, находящаяся между фронтами продольной и поперечной волн (отрезок  $CF$ ), движется в направлении точки удара с постоянной скоростью.

Диаграмма растяжения (напряжение–деформация) извивного волокна изображена на рис. 1. Напряжение предполагается равным нулю при деформации ниже  $\epsilon_0$ , а при более высоких удлинениях связь между напряжением и деформацией является линейной с наклоном, равным модулю упругости волокна  $E$ .

Удлинение нити за время  $\delta t$  равно произведению деформации волокна  $\epsilon$  на скорость продольной волны  $w$  и время  $\delta t$

$$\delta L = \epsilon w \delta t \quad (1)$$

Полная деформация волокна равна сумме деформаций расправления  $\epsilon_0$  и упругой деформации

$$\epsilon = \epsilon_0 + \frac{\sigma}{E} \quad (2)$$

Будем предполагать, что скорость удара гораздо ниже скорости звука в волокне (9 км/с для волокон СВМ), тогда, как будет показано ниже, выполняется условие  $v \ll w \ll u$ , где  $w$  – скорость поперечной волны,  $u$  – скорость продольной волны, т.е. скорость звука в извивом волокне. Это неравенство облегчает анализ и позволяет получить аналитическое решение для напряжения в волокне, а также скоростей продольной и поперечной волн.

Рассмотрим часть волокна  $DG$ , включающую фронт продольной волны. В точке  $D$  к данной части волокна приложена сила, равная произведению напряжения  $\sigma$  на площадь волокна  $s$ . В точке  $G$  сила равна нулю, поэтому полная сумма приложенных сил равна  $\sigma s$ . За время  $\delta t$  сила приводит к увеличению импульса волокна на величину  $\sigma s \delta t$ . Приращение импульса равно произведению скорости распрямленной (движущейся) части волок-

на  $\epsilon w$  на приращение массы вовлеченной в движение части волокна  $\rho s \delta t$ , где  $\rho$  – плотность волокна. Таким образом, получаем уравнение

$$\sigma = \rho \epsilon w^2 \quad (3)$$

Аналогично можно рассмотреть изменение импульса части волокна, включающей фронт поперечной волны (точку  $C$ ). Учитывая, что перед фронтом поперечной волны скорость волокна равна  $\epsilon w$  и движется оно в направлении точки  $O$ , а за фронтом волокно движется в направлении движения пули с ее скоростью  $v$ , можно получить соотношение

$$\sigma = \rho w^2 \quad (4)$$

Рассмотрев треугольник  $BCO$ , на основании теоремы косинусов с учетом условия  $v \ll w \ll u$  получаем уравнения для удлинения волокна

$$\delta L = \left( \frac{v^2}{2w} + v \cos \phi \right) \delta t \quad (5)$$

Выражения (1)–(5) представляют собой систему пяти алгебраических уравнений с пятью неизвестными ( $\sigma, \epsilon, u, w, \delta L$ ). Учитывая условие  $v \ll w$ , в соотношении (5) можно пренебречь первым членом всегда за исключением углов  $\phi \approx 90^\circ$ . По этой причине при решении системы (1)–(5) будут рассматриваться два случая. В первом случае можно пренебречь первым членом в уравнении (5), а во втором – вторым ( $\phi \approx 90^\circ$ ). Во втором случае удар является трансверсальным, а первый случай будет условно называться продольным ударом.

### ПРОДОЛЬНЫЙ УДАР

Если пренебречь первым членом в уравнении (5), решение уравнений (1)–(5) находится в виде

$$\sigma = -\frac{\epsilon_0 \rho c^2}{2} + \frac{\epsilon_0 \rho c^2}{2} \sqrt{1 + \frac{4v^2}{\epsilon_0^2 c^2} \cos^2 \phi}, \quad (6)$$

где  $c$  – скорость продольной волны при отсутствии извивости (скорость звука) [7]

$$c = \sqrt{E/\rho} \quad (7)$$

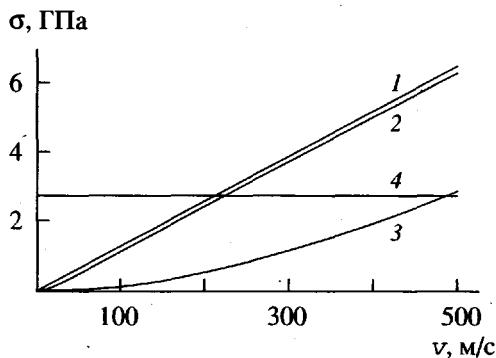


Рис. 2. Зависимость растягивающего напряжения от скорости удара при продольном ударе для прямого волокна (1) и для извитого волокна с  $\epsilon_0 = 0.3$  (2) и 10% (3); 4 – прочность волокна. Расчет при угле  $\phi = 0$  (рис. 1).

При выполнении условия  $\epsilon_0 \gg 2v\cos\phi/c$  второй член под корнем в уравнении (6) пренебрежимо мал по сравнению с единицей, и разложение корня приводит к выражению

$$\sigma = \frac{\rho v^2}{\epsilon_0} \cos^2 \phi \quad (8)$$

С учетом формулы (8) неравенство  $\epsilon_0 \gg 2v\cos\phi/c$  эквивалентно неравенству  $\sigma/E \ll \epsilon_0$ . Отношение  $\sigma/E$  равно упругой деформации волокна, которая пренебрежимо мала по сравнению с деформацией распрямления. Таким образом, уравнение (8) описывает напряжение в волокне при его сильной извитости, когда деформация распрямления волокна намного выше упругой деформации. Пренебрегая упругой деформацией в уравнении (2), скорость продольной и поперечной волн можно описать уравнениями

$$u = \frac{v}{\epsilon_0} \cos \phi \quad (9)$$

$$w = \frac{v}{\sqrt{\epsilon_0}} \cos \phi \quad (10)$$

Аналогично при малой извитости волокна упругая деформация намного выше деформации распрямления  $\epsilon_0$ , и решение записывается в виде

$$\sigma = \rho c v \cos \phi - \frac{\epsilon_0 \rho c^2}{2} \quad (11)$$

$$u = c - \frac{\epsilon_0 c^2}{2 v \cos \phi} \quad (12)$$

$$w = \sqrt{c v \cos \phi} \left( 1 - \frac{\epsilon_0 c}{4 v \cos \phi} \right) \quad (13)$$

В уравнениях (11)–(13) первые члены в правых частях представляют собой решения для неизвitetого волокна, а вторые члены являются малыми поправками, описывающими влияние извitetости. В частности, скорость продольной волны и близка к скорости звука в прямом волокне  $c$  (выражение (12)).

Напротив, в случае высокой извitetости решение уравнений (8)–(10) принципиально отличается от решения для прямого волокна. Растягивающее напряжение в этом случае пропорционально квадрату скорости удара, в то время как при малой извitetости напряжение пропорционально скорости. Скорость продольной волны (скорость звука) возрастает пропорционально  $v$ .

Критерий “малости” извitetости относителен и определяется соотношением между упругой деформацией и деформацией распрямления. Деформация распрямления волокон предполагается независимой от скорости удара. Напротив, упругая деформация растет с напряжением и, следовательно, со скоростью удара. Как следствие, одна и та же извitetость является “большой” при низкой скорости удара ( $v \ll \epsilon_0 c/2$ ), и “малой” при более высоких скоростях удара ( $v \gg \epsilon_0 c/2$ ). Так, разрывная деформация нитей Армос равна 2–2.5%, поэтому извitetость основы остается “высокой” вплоть до разрушения, а извitetость утка является “высокой” при малых скоростях удара и, в частности, при критической скорости удара. Если деформация разрушения намного меньше  $\epsilon_0$ , то вплоть до разрушения волокна  $\sigma \propto v^2$ . Если же деформация разрушения  $\sigma_f/E$  ( $\sigma_f$  – предел прочности волокна) больше  $\epsilon_0$ , то  $\sigma \propto v^2$  лишь при малых скоростях удара (когда извitetость является “высокой”), а вблизи разрушения  $\sigma \propto v$  (также извitetость является “малой”).

Зависимость растягивающего напряжения от скорости удара при продольном ударе приведена на рис. 2 для трех различных значений извitetости волокна. При отсутствии извitetости волокна (прямая 1,  $\epsilon_0 = 0$ ) растягивающее напряжение растет пропорционально скорости удара. При небольшой извitetости (кривая 2,  $\epsilon_0 = 0.3\%$ ), когда деформация распрямления  $\epsilon_0$  намного меньше разрушающей деформации, напряжение близко к прямой 1 везде за исключением начальной части кривой. При высокой извitetости волокна (кривая 3,  $\epsilon_0 = 10\%$ ), напряжения гораздо ниже и пропорциональны квадрату скорости удара (уравнение (5)). Извitetости нитей для кривых 2 и 3 близки

соответственно к извитости нитей утка и основы для ткани Армос. Прямая 4 соответствует прочности нити Армос 2.75 ГПа. Когда растягивающее напряжение достигает прочности нити, она рвется в момент удара. Пересечение прямой 4 с кривыми 1–3 определяет критическую скорость удара при соответствующей извитости нитей.

### КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ УДАРА

Критическая скорость удара, при которой разрушение происходит в момент удара, определяется из равенства растягивающего напряжения (уравнение (3)) и предела прочности волокна  $\sigma_f$

$$v^* = \sqrt{\frac{\sigma_f^2}{\rho^2 c^2 \cos^2 \phi} + \frac{\sigma_f \epsilon_0}{\rho \cos^2 \phi}} \quad (14)$$

Извитость волокон приводит к повышению критической скорости удара. Если при критической скорости удара извитость является "малой", т.е.  $\epsilon_0$  много меньше деформации разрушения, то вторым слагаемым под корнем в выражении (14) можно пренебречь и критическая скорость удара опишется формулой

$$v^* = \frac{\sigma_f}{\rho c \cos \phi} \quad (15)$$

Критическая скорость удара пропорциональна прочности волокон. Анализ уравнения (15) показывает, что высокую критическую скорость удара имеют высокопрочные и легкие волокна с низким модулем упругости ( $c = \sqrt{E/\rho}$ ). Отметим, что первые два требования являются обычными для волокон, используемых для армирования композиционных материалов. Напротив, последнее требование необычно, и для высоких ударных характеристик требуются высокопрочные и низкомодульные волокна. Это требование эквивалентно требованию высокой прочности в сочетании с высокой разрывной деформацией.

### ПОПЕРЕЧНЫЙ УДАР

Если пренебречь вторым членом в уравнении (5), совместное решение уравнений (1)–(5) и (7) приводит к кубическому уравнению

$$\sigma^3 + \sigma^2 \epsilon_0 \rho c^2 - \rho^3 c^2 v^4 / 4 = 0 \quad (16)$$

При высокой извитости волокон, когда  $\epsilon_0 \rho c^2 \gg \sigma$ , первым членом в уравнении (16) можно пренебречь, и решение записывается в виде

$$\sigma = \frac{\rho v^2}{2 \sqrt{\epsilon_0}} \quad (17)$$

Для скоростей продольной и поперечной волн имеем

$$u = \frac{v}{\sqrt{2 \epsilon_0^{3/4}}} \quad (18)$$

$$w = \frac{v}{(4 \epsilon_0)^{1/4}} \quad (19)$$

При высокой извитости волокон растягивающее напряжение возрастает пропорционально квадрату скорости удара (уравнение (17)), как при продольном ударе. Аналогично при малой извитости волокна напряжение, скорость продольной волны и скорость поперечной волны равны

$$\sigma = \rho \left( \frac{c}{2} \right)^{2/3} v^{4/3} - \frac{\epsilon_0 \rho c^2}{3} \quad (20)$$

$$u = c - \epsilon_0 \left( \frac{c^7}{2 v^4} \right)^{1/3} \quad (21)$$

$$w = \left( \frac{c v^2}{2} \right)^{1/3} - \frac{\epsilon_0 (2 c^5)}{6} \left( \frac{v^2}{c} \right)^{1/3} \quad (22)$$

Уравнения (20)–(22) описывают волокно с малой извитостью, в котором упругая деформация намного выше деформации распрямления  $\epsilon_0$ . Решение в этом случае близко к решению для поперечного удара по прямому волокну. Напряжение возрастает пропорционально  $v^{4/3}$ , а скорость продольной волны близка к скорости звука  $c$ . Вторые члены в уравнениях (20)–(22) являются малыми поправками.

Анализ полученных решений показывает, что используемое предположение  $v \ll w$  при низкой извитости волокон сводится к условию  $v \ll c$ . В случае высокой извитости с учетом выражений (18) и (19) это предположение эквивалентно условию  $\epsilon_0 \ll 25\%$ . Оба условия выполняются во всех практически важных случаях. Как и при продольном ударе, критерий "малости" извитости зависит от скорости удара. В частности, извитость утка в нитях Армос является "большой" при низкой скорости удара и "малой" при критической скорости удара.

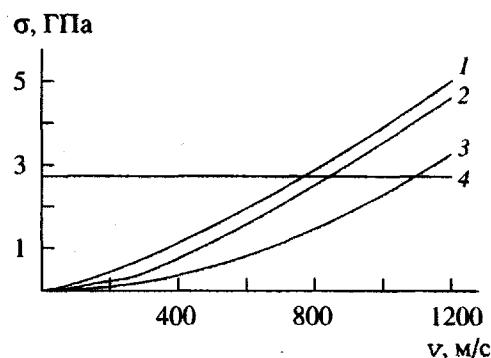


Рис. 3. Зависимость растягивающего напряжения от скорости удара при поперечном ударе ( $\phi = 90^\circ$ ) для прямого волокна (1) и для извивного волокна с  $\epsilon_0 = 1$  (2) и  $10\%$ ; 4 – прочность волокна.

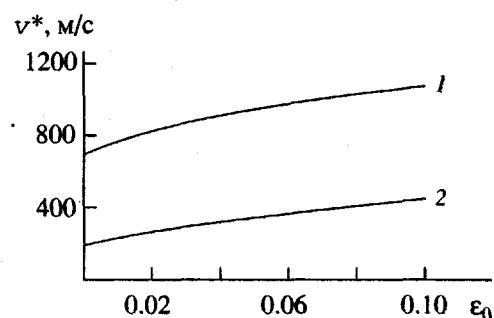


Рис. 4. Зависимость критической скорости удара от извивности нити  $\epsilon_0$  для поперечного ( $\phi = 90^\circ$ ) (1) и продольного ( $\phi = 0$ ) (2) ударов.

Зависимость растягивающего напряжения от скорости удара при поперечном ударе приведена на рис. 3. При отсутствии извивности волокна ( $\epsilon_0 = 0$ ) растягивающее напряжение растет пропорционально  $v^{4/3}$  (кривая 1). При высокой извивности волокна (кривая 3,  $\epsilon_0 = 10\%$ ) напряжения гораздо ниже и пропорциональны квадрату скорости удара.

### КРИТИЧЕСКАЯ СКОРОСТЬ УДАРА

Критическая скорость удара, при которой разрушение происходит в момент удара, можно определить из соотношения (16), приравняв растягивающее напряжение прочности волокна  $\sigma_f$

$$v^* = \sqrt[4]{\frac{4\sigma_f^3}{\rho c^2} + \frac{4\sigma_f^2 \epsilon_0}{\rho^2}} \quad (23)$$

На рис. 4 приведена зависимость критической скорости удара от извивности нити  $\epsilon_0$  для поперечного и продольного ударов. Критическая ско-

рость повышается с ростом  $\epsilon_0$  в обоих случаях. При продольном ударе, соответствующем стеснению поперечного смещения нитей, критическая скорость удара существенно ниже, чем при трансверсальном ударе.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно закону сохранения импульса, при неупругом соударении двух шаров скорость налетающего шара уменьшается вдвое, если его масса равна массе мишени. При ударе пули в тонкий металлический лист в соударении участвует часть листа, диаметр которой примерно равен диаметру пули. В связи с этим для уменьшения скорости пули вдвое толщина листа должна быть примерно равна длине пули, если плотности пули и мишени равны. Напротив, при ударе пули в волокно вместе с пулей движется все волокно, и длина волокна в противоударных тканых пакетах (равная ширине пакета) играет роль толщины мишени. Как следствие, тканые пакеты имеют уникально высокие противоударные характеристики. Однако картина удара принципиально меняется, если скорость удара достигает критического значения. В этом случае удар по волокну аналогичен удару по тонкому листу, и способность ткани диссирировать удар резко падает.

Извитость волокон приводит к увеличению критической скорости удара. Если деформация распрямления намного ниже упругой деформации волокна, то возникают лишь малые поправки к напряжению и скорости движения волны. Напротив, если деформация распрямления волокна превышает упругую деформацию, то изменяется сам характер зависимостей напряжения и скорости волн от скорости удара. В частности, напряжения растут пропорционально квадрату скорости удара, а скорость движения продольной волны не равна скорости звука и пропорциональна скорости удара.

Рост извивности волокна приводит к изменению механизма движения обеих волн. Смена механизма происходит при переходе от малой к высокой извивности волокна. При малой извивности скорость продольной волны определяется упругостью волокна, однако при высокой извивности движение волны определяется временем распрямления волокна. Здесь имеется аналогия с движением упругих шаров, помещенных в горизонтальную цилиндрическую трубу. При наличии контакта между шарами скорость движения волны равна скорости звука. Если же между шарами имеется некоторый промежуток, то скорость волны определяется уже не скоростью звука, а скоростью шаров и расстоянием между ними.

На рис. 5 приведена зависимость критической скорости удара от угла  $\phi$ . В отсутствие извитости волокон критическая скорость при продольном ударе определялась по формуле (15). Расчет проводили для волокон Армос с прочностью 2.8 ГПа, плотностью 1450 кг/м<sup>3</sup> и модулем упругости 120 ГПа. Скорость звука с определяли по формуле (7). Вычисленная зависимость приведена в виде кривой ABC (кривая 1). Критическую скорость при поперечном ударе находили по формуле (23), она приведена в виде отрезка DE (прямая 2).

Условие перехода от продольного к поперечному удару находится из уравнения (5) и имеет вид  $v^2/2w = v \cos \phi$ . С учетом уравнений (4) и (23) это условие определяется пересечением кривой 1 и прямой 2 на рис. 5, которое наблюдается при  $\phi \approx 75^\circ$ . Таким образом, на рис. 5 можно выделить две области, соответствующие продольному и поперечному удару. В первой области ( $\phi < 75^\circ$ ) критическая скорость определяется кривой AB, во второй области ( $\phi > 75^\circ$ ) – отрезком прямой BE. Зависимость критической скорости удара от  $\phi$  в обеих областях описывается кривой ABE, показанной на рисунке сплошной линией (кривая 3). При уменьшении угла удара снижается критическая скорость. Кривая 4 показывает аналогичную зависимость при извитости волокон  $\epsilon_0 = 0.1$ . Увеличение извитости волокон приводит, во-первых, к росту критической скорости удара и, во-вторых, к уменьшению критического угла удара, при котором наблюдается переход от продольного к поперечному удару.

Эффективная толщина бронепакета при ударе также зависит от угла удара. Поскольку эффективная толщина пропорциональна  $1/\sin \phi$ , очевидно, ударные характеристики бронепакета минимальны при некотором угле удара. Точно этот угол необходимо определять в эксперименте, однако рис. 5 позволяет предположить, что он находится в диапазоне  $55^\circ$ – $70^\circ$ . Таким образом, удар по тканому бронепакету под углом  $55^\circ$ – $70^\circ$  является более опасным, чем прямой трансверсальный удар. Такое поведение волокон принципиально отличается от поведения традиционных бронематериалов. Как следствие, испытание тканых пакетов на трансверсальный (“лобовой”) удар может привести к завышению защитных свойств бронепакета. Поэтому необходимы испытания бронепакетов на удар под некоторым углом ( $55^\circ$ – $70^\circ$ ).

Критическая скорость удара для неизвитой нити при продольном ударе (~210 м/с) существенно ниже, чем при трансверсальном ударе (760 м/с). Таким образом, стеснение поперечного смещения нитей, приводящее к переходу от поперечно-

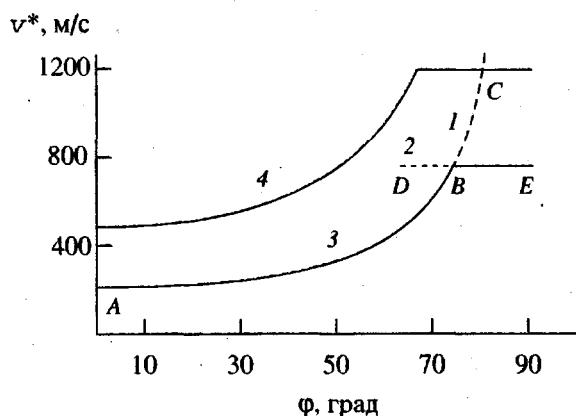


Рис. 5. Зависимость критической скорости от угла удара  $\phi$  для продольного (1) и поперечного удара (2) при  $\epsilon_0 = 0$ ; 3 – переход от продольного к поперечному удару, 4 – критическая скорость удара при  $\epsilon_0 = 0.1$ .

го к продольному удару, вызывает снижение критической скорости удара. Как следствие, пакет должен быть достаточно “рыхлым” для того, чтобы возможно было трансверсальное смещение нитей. Следует отметить, что рассчитанная критическая скорость при трансверсальном ударе (760 м/с) близка к экспериментальному значению 670 м/с [5].

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ показывает, что извитость волокон приводит к увеличению критической скорости удара. Если деформация расправления волокна превышает упругую деформацию, то вид аналитических решений для растягивающего напряжения и скоростей продольной и поперечной волн принципиально иной, чем при ударе по прямому волокну. В частности, напряжение растет пропорционально квадрату скорости удара, а скорость продольной волны пропорциональна скорости удара. Предложенная модель предсказывает, что удар под углом  $55^\circ$ – $70^\circ$  является более опасным, чем прямой удар “в лоб”. Слишком высокая плотность бронепакета, приводящая к стеснению поперечного смещения волокон в ткани, может приводить к снижению критической скорости удара.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Рахматуллин Х.А. // Прикладная математика и механика. 1952. Т. 16. С. 24.

2. *Smith J.C., McCrackin F.L., Schifer H.F.* // *Textile Res. J.* 1958. V. 28. P. 288.
3. *Smith J.C., Blandford J.M., Schifer H.F.* // *Textile Res. J.* 1960. V. 30. P. 752.
4. *Рогозинский А.К., Баженов С.Л., Зеленский Э.С.* // *Высокомолек. соед. Б.* 1990. Т. 32. № 6. С. 437.
5. *Bazhenov S., Rozhkov A.L.* // *J. Mater. Sci. Letters.* 1998 (to be published).
6. *Bazhenov S.* // *J. Mater. Sci.* 1997. V. 32. P. 4167.
7. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Теория упругости. М.: Наука, 1965.

## **Effect of the Fiber Winding on the Impact Tensile Stress**

**S. L. Bazhenov**

*Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences,  
ul. Kosygina 4, Moscow, 117334 Russia*

**Abstract**—Effect of the fiber winding on the value of tensile stress developed in the fiber upon impact was theoretically studied. An impact at a velocity below certain critical level gives rise to longitudinal and transverse waves in the fiber. The longitudinal wave unwinds and extends the fiber, the extension front being followed by the transverse wave having a triangular shape with the vertex at the point of impact. Above the critical velocity level, the fiber is ruptured at the moment of impact. The critical impact velocity increases with the degree of fiber winding. If the deformation of fiber unwinding exceeds the elastic deformation, the form of solutions describing the tensile stress and the velocities of longitudinal and transverse wave changes. The stress increases in proportion to the squared impact velocity, while the longitudinal wave velocity is a linear function of the impact velocity.