

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**Институт металлургии  
и материаловедения  
им. А.А. Байкова РАН**

**80 лет**

Москва

ИМЕТ РАН

2018 г.

**УДК 669.1; 546.1; 546.3**

Институт металлургии материаловедения им. А.А. Байкова РАН – 80 лет.  
Сборник научных трудов.  
М.: Интерконтакт Наука, 2018, 644 с.

ISBN 978-5-902063-58-2

Сборник подготовлен в связи с 80-летием создания Института Металлургии и материаловедения им. А.А. Байкова Российской академии наук. В статьях содержатся материалы по основным направлениям научной деятельности в области металлургии черных, цветных и редкоземельных металлов, материаловедения металлических, керамических, нанокристаллических, композиционных материалов, развития методов исследования состава, структуры и свойств материалов.

Материалы сборника могут представлять интерес для ученых и сотрудников научно-исследовательских и учебных институтов и университетов, промышленных предприятий, работающих в области металлургии черных, цветных и редких металлов, материаловедения неорганических материалов и методов исследования.

*Редакционная коллегия*

Академик К.А. Солнцев (ответственный редактор), академик О.А. Банных (зам. Ответственного редактора), академик В.М. Бузник, академик В.М. Иевлев, академик Ю.В. Цветков, чл.-корр. РАН М.И. Алымов, чл.-корр. РАН С.М. Баринов, чл.-корр. РАН Г.С. Бурханов, чл.-корр. РАН Григорович К.В., чл.-корр. РАН А.Г. Колмаков, чл.-корр. РАН В.С. Комлев, д.ф.-м.н. С.В. Симаков, к.т.н. О.Н. Фомина (ответственный секретарь)

ISBN 978-5-902063-58-2

© ИМЕТ РАН, 2018

## Свойства и разрушение анизотропных композиционных материалов при статической деформации и ударе.

*В.В. Кудинов, И.К. Крылов, В.И. Мамонов, Н.В. Корнеева*

DOI: 10.30791/978-5-902063-58-2-358-373

### Введение

Армированные пластики являются анизотропными композиционными материалами (КМ), состоящими из одного вида непрерывных армирующих волокон и матрицы. Гибридные композиционные материалы (ГКМ) содержат два и большее количество волокон различного типа. Чем больше волокон входит в состав материала, тем большее значение приобретает их взаимодействие с матрицей на межфазной границе. Матрица распределяет нагрузку между волокнами и консолидирует их в монолитный компактный материал. Особенно большое значение взаимодействие компонентов приобретает при кратковременном ударном воздействии. Кратковременность удара снижает или исключает возможность перераспределения энергии в результате релаксации напряжений и диссипации энергии разрывов волокон при деформации КМ. Компоненты материала разрушаются в местах концентрации напряжений. Наиболее высокие свойства материал будет иметь при совместной деформации компонентов на всех этапах его нагружения вплоть до разрушения.

Рассмотрим возможность управления свойствами ГКМ, исходя из его компонентов на примере углепластика. Для повышения пластичности и работы разрушения в углепластики вводят эластичное волокно из сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ) [1,2]. Свойства СВМПЭ-волокон можно повысить их активацией с помощью плазменной обработки [3], которая повышает их поверхностную энергию. Благодаря плазменной обработке улучшается смачивание и пропитка волокон матрицей и увеличивается прочность соединения между ними на межфазной границе.

Совместная деформация всех компонентов ГКМ и его монолитность зависят от свойств матрицы. При относительной деформации до разрыва матрицы  $\varepsilon_m$  большей, чем деформация до разрыва волокна  $\varepsilon_f$ , осуществляется соотношение  $\varepsilon_m > \varepsilon_f$ . В этом случае матрица сопровождает деформацию волокна вплоть до полного разрушения материала.

Если  $\varepsilon_m < \varepsilon_f$ , то матрица при деформации растрескивается и образует концентраторы напряжений на волокнах. Волокна разрываются и дробятся, что ведёт к быстрому разрушению КМ [4].

Для анализа свойств анизотропных материалов при ударе был разработан метод “Разрыв Ударом” (РУ) или (Impact Break (IB) [2, 5-7]. Метод РУ (IB) учитывает анизотропную структуру и состав КМ и ГКМ, а также то, что нагрузка на армирующие волокна передаётся через матрицу.

Образец РУ (IB) для испытаний представляет собой композит в виде стержня с однонаправленным расположением волокон и законцовками для жёсткого закрепления в копре. Удар наносится поперёк образца в его центр. Схема удара приведена на рис. 1, а. Скорость удара в  $\sim 10000$  раз превосходит скорость статического нагружения. При испытаниях образцов РУ (IB) измеряется сила и энергия удара, деформация образца и длительность процесса разрушения. Метод РУ (IB) позволяет изучать свойства и механизмы деформации и разрушения КМ и ГКМ.

Цель работы состояла в исследовании свойств и механизмов деформации и разрушения анизотропных КМ при статическом нагружении и ударе.

### Методика экспериментов, оборудование и материалы

Исследовали КМ с двумя типами матрицы - пластичной (ПМ) и более прочной, но малопластичной жёсткой матрицей (ЖМ). Матрица ЖМ состояла из полимерной композиции на основе эпоксидной смолы НТ2 от компании Роу-Systems (торговой марки R&G, Германия) с отвердителем НТ2, соотношение смолы к отвердителю составляло 100:48. Композиты получали в режиме холодного отверждения в течение 24 ч, при этом рабочее время матрицы до гелеобразования составляло 45 мин.

Для получения пластичной матрицы применяли ту же самую полимерную композицию на основе смолы и отвердителя торговой марки НТ2, но в неё добавляли до 37% пластификатора ДЭГ-1.

Свойства матрицы при ударе (табл.1) определяли на маятниковом копре Roell Amsler RKP-450 с компьютерным управлением, что позволило получить графические зависимости нагрузки от прогиба и работу разрушения образца матрицы в реальном масштабе времени. Испытывали цилиндрические образцы как жёсткой, так и пластичной матрицы при поперечном ударе маятника копра в центр образца. Диаметр образца был 11,4 мм, длина 70 мм. Измеряли прогиб образца  $\Delta$  при разрушении, предел прочности при изгибе  $\sigma_b$  и удельную работу разрушения  $\alpha$ .

Для получения образцов КМ и ГКМ применяли жёсткоцепные углеродные волокна торговой марки Tenax® – J HTA40E13 3K 200 tex (Teijin Limited, Япония), жёсткоцепные арамидные волокна Армос® (Тексма, Россия) и гибкоцепные СВМПЭ-волокна торговой марки D800 Pegasus™ H Series Fiber Product Spec. (Shanshai Pegasus Materials Co, Ltd., Китай). Углеродное волокно (УВ) использовали в исходном состоянии, то есть в состоянии поставки, без какой-либо обработки (свойства волокон в табл. 2).

Таблица 1

Свойства пластичной матрицы (ПМ) и более прочной жёсткой матрицы (ЖМ) при ударе

Свойство	ПМ	ЖМ
$\Delta$ , мм	11,5	2,2
$\sigma$ , МПа	12,6	23,6
$\alpha$ , Дж/см <sup>2</sup>	12,5	3,5

Образцы композитов для испытаний изготавливали пропиткой матрицей пучка однонаправленных непрерывных многофиламентных волокон с последующим отверждением по заданному режиму. Образец содержал от 50 до 70 тысяч филаментов и являлся однонаправленным КМ или ГКМ. В случае ГКМ пучок состоял из различных волокон.

В процессе изготовления гибридного волокна, УВ и СВМПЭ-волокна скручивали в режиме 33 об/м, что сближало филаменты и улучшало их смачивание и пропитку матрицей [2,8]. Изменяя соотношение различных волокон в скрутке, получали ГКМ переменного состава, например, углепластики, содержащие 20, 50, 80% СВМПЭ-волокон D800. Образец ГКМ имел форму стержня диаметром  $d = 2,3$  мм и длиной рабочей части  $L = 68$  мм (рис. 1, в). Зажимы для крепления образца изготавливали из матрицы в специальном приспособлении, их длина, то есть длина законцовок для закрепления в копре, составляла  $l = 24$  мм. Образцы состояли из 50% волокна и 50% матрицы по объёму.

СВМПЭ-волокно D800 применяли в исходном (неактивированном) и активированном плазмой пропана состоянии [9]. Активация плазмой увеличивала поверхностную энергию волокна и повышала его адгезию к матрице [8-10].

При испытании ГКМ концы образцов жёстко закрепляли в копре. Удар наносили в середину образца поперёк волокон на маятниковом копре Roell Amsler RKP-450 с компьютерным управлением и записью динамической кривой нагрузка – прогиб. Головка ударника имела радиус  $R =$

3 мм. Скорость удара была 5,25 м/с, что соответствует низкоскоростному удару. Образцы разрушались в месте удара или в два этапа. На первом этапе происходил сдвиг волокон в матрице в месте крепления образца и резкое падение нагрузки. Затем волокно вытягивалось из матрицы. При испытаниях методом РУ (ИВ) [2,5-7] получали следующие экспериментальные данные о разрушении образца:  $v$  – скорость удара;  $P$  – сила удара;  $P'$  – растягивающая и разрывающая образец сила;  $\Delta$  – прогиб образца в месте удара;  $W$  – работа разрушения образца.

Таблица 2

Свойства углеродного волокна Tenax® – j HTA40 E13 3K 200 tex, арамидного волокна Армос® и СВМПЭ-волокна D800

Волокно	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$\sigma$ , ГПа	E, ГПа	$\varepsilon$ , %
Tenax®	1,77	4,18	236	1,77
Армос®	1,45	5	140	3,5-4,5
D800	0,97	2,48	85	4,0

Исходя из распределения сил при ударе (рис.1, с) рассчитывали продольную  $X$  и относительную деформацию растяжения  $\varepsilon$  (%) при растяжении образца по формулам (1) и (2), соответственно:

$$X = 2 \times \left( \sqrt{\left(\frac{L}{2}\right)^2 + \Delta^2} - \frac{L}{2} \right), \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{X}{L}. \quad (2)$$

Растягивающую и разрывающую образец силу  $P'$  считали по формуле

$$P' = \frac{P}{2 \cos \gamma}, \quad (3):$$

где  $\gamma$  - угол между направлением действия сил  $P$  и  $P'$ .

Предельное разрушающее напряжение  $\sigma$  рассчитывали по формуле (4):

$$\sigma = \frac{P'}{S}, \quad (4)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения образца.

Удельную работу разрушения образца  $\alpha$  при низкоскоростном ударе по методу РУ (ИВ) рассчитывали по формуле:

$$\alpha = \frac{W}{S} . \tag{5}$$

Если разрушение образца происходило со сдвигом и вытягиванием волокна из матрицы, то рассчитывали сдвиговую прочность по формуле (6):

$$\tau = \frac{P''}{F} , \tag{6}$$

где F - площадь поверхности образца в закреплении длиной l; а силу P'', вытягивающую волокно из матрицы, рассчитывали по формуле (7):

$$P'' = \sqrt{(P')^2 - P^2} . \tag{7}$$

Статические испытания проводили на машине Инстрон 3382 поперечным нагружением таких же образцов, что и при ударе. Нагрузку давали в середину образца со скоростью 5 мм/мин.

Полученные свойства КМ приведены на рис. 2-7 и табл. 3-8.

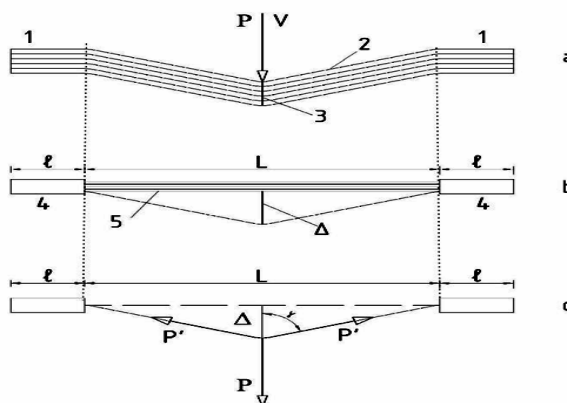


Рис.1. Метод PУ: (а) схема удара по композитной пластине 1 силой P со скоростью v и формирование прогиба 2 и разрушения 3 в месте удара; (б) схема PУ (IB) образца КМ при моделировании удара: образец 5 длиной L и диаметром d с жёстко зафиксированными концами 4 с длиной l, прогиб Δ образца в месте разрушения; и (с) схема распределения растягивающей и разрывающей силы P' в образце при поперечном ударе силой P, где γ – угол между направлениями действия сил P и P'.

## Результаты и обсуждение

Каждый из компонентов проявляет свои свойства в ГКМ. Свойства самого ГКМ зависят от того, как и через какие механизмы эти свойства в нём сочетаются.

В анизотропных материалах взаимодействие компонентов происходит на границах раздела между ними. В ГКМ нагрузка на волокна передаётся матрицей касательными напряжениями на границе с волокном. Условием постоянства передачи напряжений является совместная деформация матрицы и волокна  $\epsilon_m > \epsilon_f$ .

В случае  $\epsilon_m < \epsilon_f$  матрица разрушается раньше разрыва волокон, и передача напряжений прекращается. Матрица растрескивается, чем создаёт концентраторы напряжений и инициирует разрушение волокон.

Сопоставим диаграммы РУ (ИВ) деформации “нагрузка-прогиб” углепластиков (рис.2) с матрицей ПМ (кривая 1, что соответствует варианту  $\epsilon_m > \epsilon_f$ ) и с матрицей ЖМ (кривая 2, что соответствует варианту  $\epsilon_m < \epsilon_f$ ).

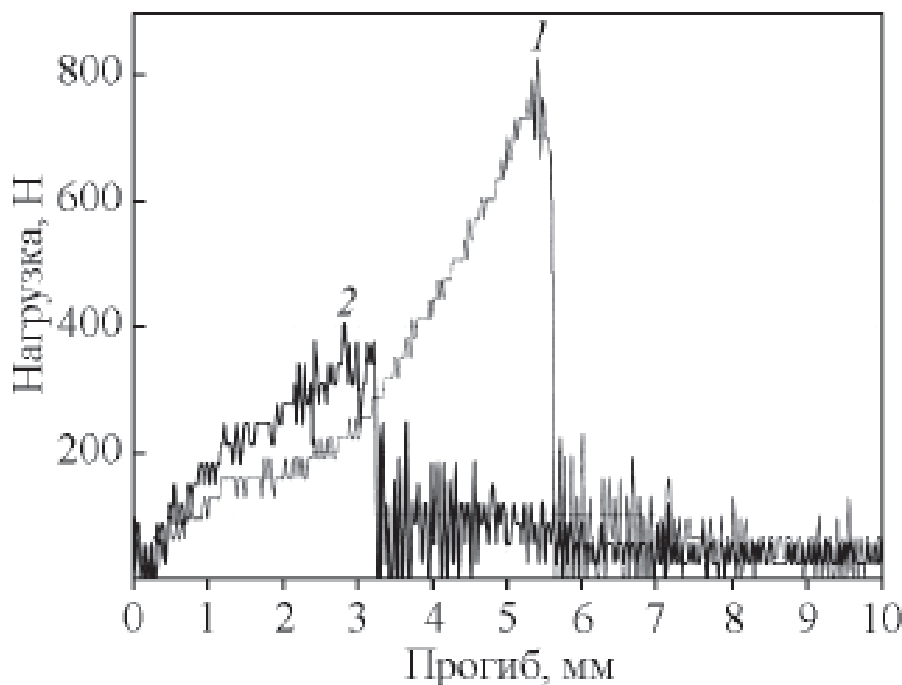


Рис.2. Диаграмма деформации (нагрузка-прогиб) образцов КМ на основе пластичной матрицы ПМ – (1) и жёсткой матрицы ЖМ – (2), армированных углеродными волокнами.



С первого момента удара начинается разрыв волокон, как с матрицей ЖМ, так и с матрицей ПМ. Разрывы объясняются прохождением ударной волны напряжений вдоль жёстких углеродных волокон. Наиболее мощные и частые разрывы с колебаниями нагрузки до  $\sim 150$  Н происходят при использовании матрицы ЖМ.

Быстрое накопление разрывов приводит к разрушению КМ при очень небольшой деформации  $\varepsilon = 0,44\%$ , что значительно меньше возможности деформации углеродного волокна при разрыве  $\varepsilon = 1,77\%$  (табл. 2). Разрывы волокон и быстрое разрушение КМ инициируются растрескиванием матрицы  $\varepsilon_m < \varepsilon_f$ .

Другой механизм деформации и разрушения КМ имеет место с матрицей ПМ, когда соблюдается условие  $\varepsilon_m > \varepsilon_f$  (рис.2, кривая 1). Матрица деформируется вместе с волокном вплоть до разрушения КМ при  $\varepsilon = 1,4\%$ . Разрывы волокон (пружинки на кривой) возникают на наиболее нагруженных участках и налагаются на ступенчатую деформацию композита в целом. Удельная работа разрушения КМ с матрицей ПМ возрастает в 2,6 раза (с 15 до 39 Дж/см<sup>2</sup>), а его прочность в 1,2 раза (с 489 до 593 МПа) (табл.3).

Таблица 3

Свойства КМ, армированных углеродным волокном Tenax® на основе матриц ПМ и ЖМ

Матрица	$\sigma$ , МПа	$\alpha$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\varepsilon$ , %	Разрушение КМ
ПМ	593	39	1,4	Разрыв
ЖМ	489	15	0,44	Разрыв

Другой вид разрушения КМ – это отделение волокна от матрицы в результате сдвига и дальнейшего вытягивания волокна из матрицы (рис.3, табл. 4). В этом случае прочность соединения волокна с матрицей может быть увеличена активацией волокна.

Таблица 4

Свойства КМ на основе матрицы ПМ, армированных активированным плазмой пропана СВМПЭ-волокном D800 и исходным необработанным волокном

Волокно D800	$\sigma$ , МПа	$\alpha$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\varepsilon$ , %	$\tau$ , МПа	Разрушение
Исходное	866	81	1,8	21	Сдвиг
Пропан	1026	90	1,8	25	Сдвиг

Рассмотрим влияние активации СВМПЭ-волокна D800 плазмой пропана [9] на характер и механизмы разрушения КМ (рис.3, табл. 4) на основе матрицы ПМ. На рис.3 и 5 кривые деформации сглажены для более точной оценки экспериментальных данных.

Активация СВМПЭ-волокна D800 плазмой пропана увеличивает  $\tau$  в  $\sim 1,2$  раза (с 21 до 25 МПа), а также повышает  $\sigma$  и  $\alpha$ . Поэтому в дальнейших экспериментах использовали активированное плазмой СВМПЭ-волокно D800.

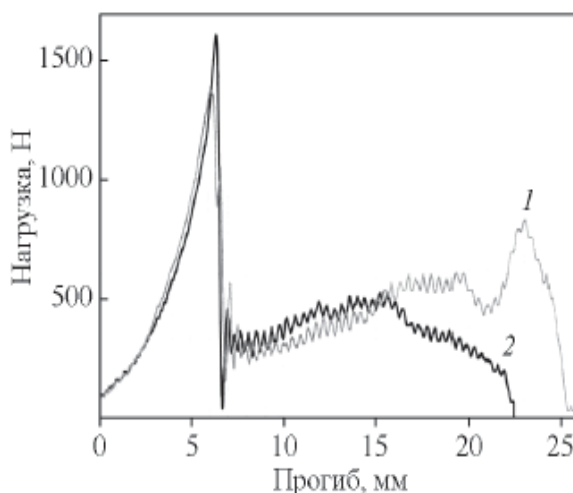


Рис.3. Диаграмма деформации (нагрузка-прогиб) образцов КМ, армированных СВМПЭ-волокном D800 в исходном состоянии – (1), и волокном активированным плазмой пропана – (2).

Разрушение КМ происходит в два этапа: на первом этапе волокно сдвигается в матрице, что вызывает резкое падение нагрузки; а на втором этапе волокно вытягивается из матрицы.

Свойства ГКМ зависят от свойств и взаимодействия в нём компонентов. Рассмотрим свойства ГКМ, упрочнённого волокнами D800 и углеродными волокнами при соотношении 50:50% (рис.4, табл.5). Такой композит на основе матрицы ПМ (рис.4, кривая 1) разрушается в результате ступенчатой деформации с редкими разрывами волокон в начале нагружения. Прочность  $\sigma$  ГКМ повышается по сравнению с углепластиком в  $\sim 1,4$  раза (с 593 до 836 МПа), удельная работа разрушения  $\alpha$  увеличивается в  $\sim 2,1$  раза (с 39 до 84 Дж/см<sup>2</sup>). Волокна и матрица деформируются совместно и разрушаются одновременно при разрыве ГКМ, происходящем при  $\epsilon = 2,1\%$ .

Деформация ГКМ на основе ЖМ (рис. 4, кривая 2), что соответствует варианту  $\varepsilon_m < \varepsilon_f$ , резко отличается от деформации с матрицей ПМ. Они совпадают только на начальном участке кривой при прогибе до 1,5 мм, в период выравнивания напряжений между компонентами.

Таблица 5

Свойства ГКМ на основе матриц ПМ и ЖМ, состоящих из 50% углеродного волокна Терах® и 50 % активированного плазмой пропана СВМПЭ-волокна D800

Матрица	$\sigma$ , МПа	$\alpha$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\varepsilon$ , %	Разрушение
ПМ	836	84	2,1	Разрыв
ЖМ	677	40	1,16	Разрыв

Дальнейшее разрушение происходит в результате многочисленных разрывов волокон с выделением упругой энергии, вызывающей колебания нагрузки до 100Н. Разрывы ведут к дроблению и фрагментации волокон. Свойства ГКМ падают и становятся ниже свойств ГКМ с матрицей ПМ: прочность  $\sigma$  уменьшается в  $\sim 1,2$  раза (с 836 до 677МПа), а удельная работа разрушения  $\alpha$  падает в  $\sim 2,1$  раза (с 84 до 40 Дж/см<sup>2</sup>).

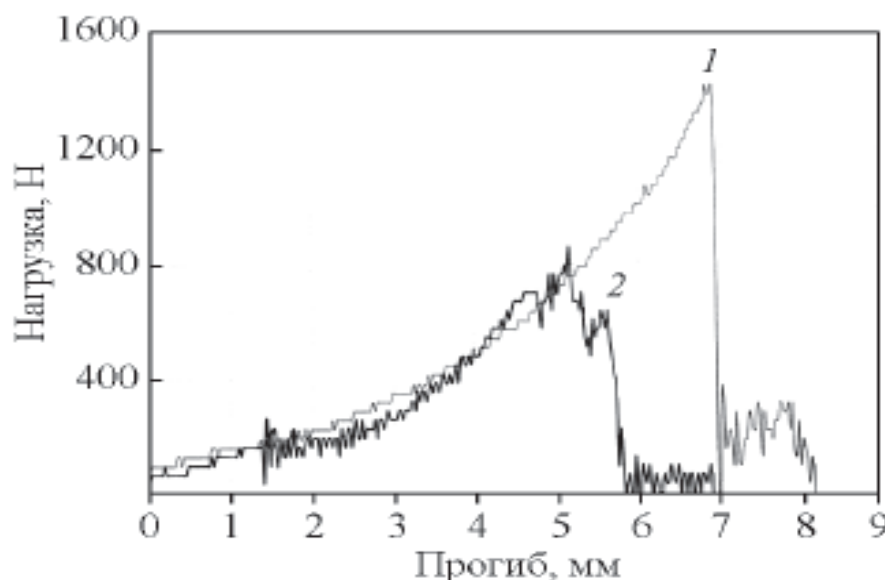


Рис.4. Диаграмма деформации (нагрузка-прогиб) образцов ГКМ, состоящих из 50% углеродного волокна Терах® и 50% СВМПЭ-волокна D800 на основе пластичной матрицы ПМ – (1) и жёсткой матрицы ЖМ – (2).

Гибридизация в результате совмещения волокон D800 с углеродными волокнами в единое волокно позволяет получать ГКМ с более высокими свойствами по сравнению со свойствами углепластиков (рис. 5, табл. 6).

Введение 20% волокна D800 в углепластик повышает его прочность  $\sigma$  в  $\sim 1,3$  раза (с 594 до 779 МПа) и удельную работу разрушения  $\alpha$  в  $\sim 1,3$  раза (с 47 до 61 Дж/см<sup>2</sup>). Меняя соотношение углеродных волокон и СВМПЭ-волокон D800, можно изменять свойства ГКМ и одновременно повышать его удельные свойства, поскольку введение волокон D800 уменьшает плотность  $\rho$  материала, что хорошо согласуется с экспериментами работы [2]. При деформации до  $\varepsilon = 1,65\%$  (табл. 6) основной вклад в прочность ГКМ вносит жёсткое углеродное волокно, которое в 3 – 4 раза прочнее волокна D800 при этой деформации.

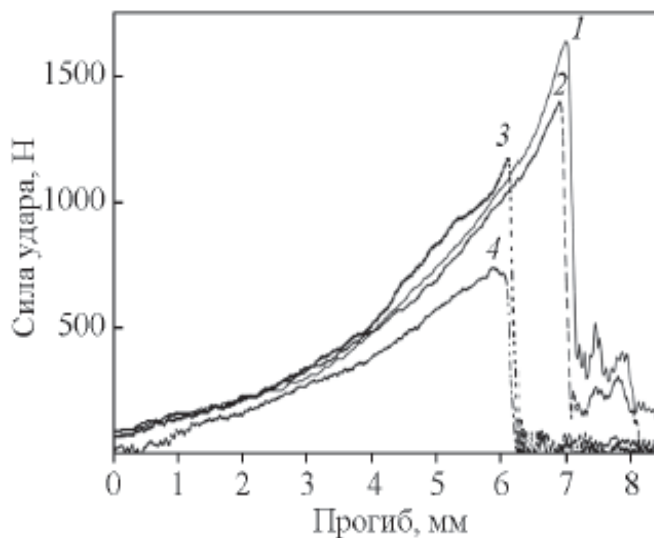


Рис.5. Диаграмма деформации (нагрузка-прогиб) образцов ГКМ на основе пластичной матрицы ПМ, состоящих из углеродного волокна (УВ) Tenax® и СВМПЭ-волокон D800 в следующих соотношениях: 1 - УВ: СВМПЭ-волокно = 20:80%; 2 - УВ: СВМПЭ-волокно = 50:50%; 3- УВ: СВМПЭ-волокно = 80:20%; 4 - 100% УВ.

Увеличение содержания волокон D800 до 50% вызывает переход разрушения ГКМ от разрыва к сдвигу. Относительная деформация  $\varepsilon$  становится постоянной  $\sim 2,1\%$ . Пластичное волокно D800 дополняет роль матрицы в распределении напряжений между углеродными волокнами.

Таблица 6

Влияние соотношения углеродных волокон TeraX® и активированных плазмой пропана СВМПЭ-волокон D800 на свойства ГКМ на основе матрицы ПМ

Соотношение волокон в ГКМ					
Активированные плазмой пропана D800, %	0	20	50	80	100
УВ, %	100	80	50	20	0
Свойства ГКМ на основе матрицы ПМ					
$\sigma$ , МПа	594	779	836	986	1026
$\alpha$ , Дж/см <sup>2</sup>	47	61	84	89	87
$\varepsilon$ , %	1,4	1,65	2,1	2,1	1,8
$\tau$ , МПа	-	-	-	24	25
$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1,77	1,610	1,33	1,13	0,97
Разрушение ГКМ	Разрыв		Сдвиг		

Необходимо отметить, что по мере увеличения нагрузки и деформации в ГКМ растут напряжения между разными волокнами, возникающие из-за разницы их модулей. Например, модуль углеродного волокна в  $\sim 2,8$  раза больше модуля волокна D800 (табл. 2). Волокна в ГКМ деформируются вместе до тех пор, пока возникающие напряжения сдвига  $\tau$  на межфазной границе не превысят сдвиговую прочность соединения волокна с матрицей (табл. 4 и 6). Матрица отслаивается от волокна и ГКМ разрушается. Его прочность ограничена сдвиговой прочностью соединения  $\tau$ . При недостаточном  $\tau$  напряжения на волокнах не достигают величины, необходимой для их разрушения, и они не разрываются.

При ударе скорость нагружения КМ и его деформирования по сравнению со статикой увеличивается в  $\sim 10^4$  раз с 5 мм/мин до 5,25 м/с, что приводит к изменению механизмов разрушения КМ (рис. 6 и 7) и его свойств (табл. 7 и 8).

При статическом нагружении образца ход кривых деформации плавный (кривые 2 и 3, рис. 6 и кривая 2, рис. 7), а деформация увеличивается по мере роста нагрузки.

Удар вызывает разрушение и дробление волокон с начала его действия, как у КМ с жёстким углеродным волокном (с жёсткой матрицей -

кривая 1, рис. 6), так и у КМ с арамидным волокном Армос® с жёсткой матрицей кривая 1 (при ударе), а кривая 2 (при статике) плавная, рис. 7). Деформация материала как с жёсткой, так и с пластичной матрицей сопровождается постоянным разрывом волокон в процессе нагружения.

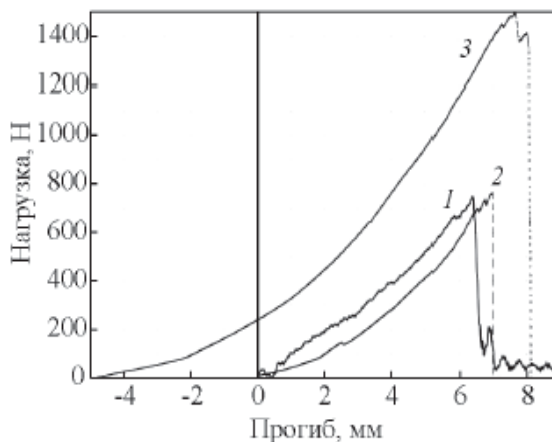


Рис.6. Диаграммы деформации (нагрузка – прогиб) образцов углепластика на основе пластичной гибкой матрицы ПМ (кривые 2 и 3) и жёсткой матрицы ЖМ (кривая 1) при ударе (кривая 1) и статике (кривые 2 и 3).

Из диаграмм хорошо видно, что при переходе от статических нагрузок к ударным свойства материалов, армированных как жёсткими углеродными волокнами, так и более эластичными арамидными волокнами изменяются одинаково. В статике кривые плавные, а при ударе кривые напоминают пилу. Столь существенное отличие механизмов разрушения КМ при статике и ударе объясняется кратковременностью действия удара. При ударе в КМ возникают локальные участки перенапряжения. Кратковременность действия удара 1-2 мс исключает возможность релаксации или перераспределения в них напряжений. Волокна на этих участках разрываются, а выделяющаяся упругая энергия разрыва проявляется в виде пиков (зубцов) на кривой деформации, что совпадает с данными в работах [6,7].

При ударе сочетание жёсткой матрицы и жёсткого углеродного волокна вызывает в КМ разрывы волокон с наибольшим выделением энергии (кривая 2, рис. 2) по сравнению с углепластиком на основе пластичной матрицы (кривая 1, рис. 2). В обоих случаях кривые приобретают вид “зачубренной пилы”. Разрывы и дробление волокон приводят к быстрому

разрушению углепластиков с жёсткой матрицей при малой деформации  $\varepsilon = 0,47\%$ , и низкой удельной работе разрушения  $\alpha = 14 \text{ Дж/см}^2$  (табл. 7).

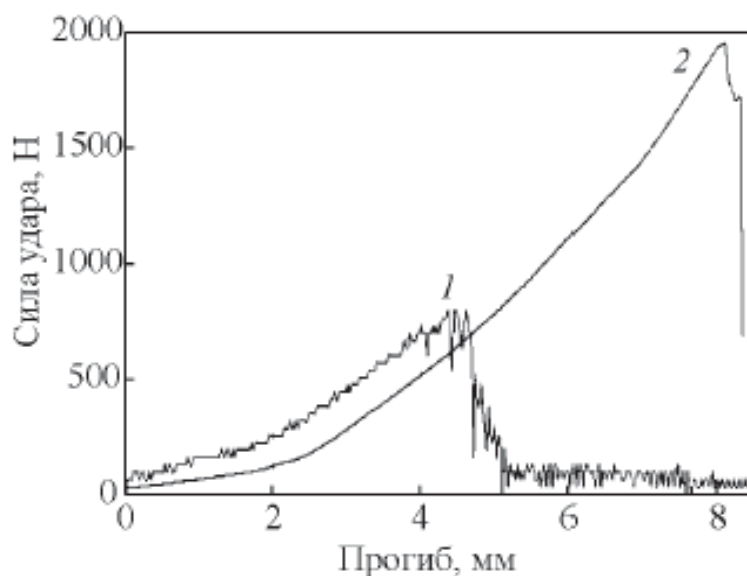


Рис.7. Диаграмма деформации (нагрузка – прогиб) образцов органопластиков, армированных арамидным волокном Армос® на основе жёсткой матрицы ЖМ при ударе (1) и статическом нагружении (2).

При статическом нагружении КМ с пластичной матрицей деформация  $\varepsilon = 6,5\%$  состоит из деформации углеродного волокна  $\varepsilon = 1,77\%$  и деформации от вытягивания волокна из пластичной матрицы. Вытягивание увеличивает работу, необходимую для разрушения материала  $\alpha$  в  $\sim 3,2$  раза с 48 до  $154 \text{ Дж/см}^2$  (табл. 7).

Таблица 7.

Свойства углепластиков с пластичной матрицей (ПМ) и жёсткой матрицей (ЖМ) при статическом нагружении и ударе

Воздействие	Матрица	$\varepsilon$ , %	$\sigma$ , МПа	$\alpha$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\tau$ , МПа
Удар	ПМ	1,7	496	57	12
Статика	ПМ	6,5	524	154	13
Удар	ЖМ	0,47	448	14	11
Статика	ЖМ	2,1	448	48	11

При ударе пластичная матрица в углепластике увеличивает деформацию  $\varepsilon$  в  $\sim 3,6$  раза с 0,47 до 1,7 % и удельную работу разрушения  $\alpha$  в  $\sim 4$  раза с 14 до 57 Дж/см<sup>2</sup> (табл. 7).

Пластичная матрица по сравнению с жёсткой матрицей несколько увеличивает прочность  $\sigma$  углепластиков при ударе в  $\sim 1,1$  раза с 448 (ЖМ) до 496 (ПМ) МПа, а также при статике в  $\sim 1,2$  раза с 448 (ЖМ) до 524 (ПМ) МПа. Увеличение ограничено низкой прочностью соединения волокна с матрицей  $\tau = 11-13$  МПа (табл. 7).

При статическом нагружении КМ с волокном Армос® и жёсткой матрицей образец деформируется на величину в  $\sim 3,13$  раза большую с 0,87 при ударе до 2,73 % при статике (табл. 8). Такой материал обладает в  $\sim 1,4$  раза большей прочностью  $\sigma$  и в  $\sim 3,7$  раза большей удельной работой разрушения  $\alpha$  при статике. Прочность  $\sigma$  возрастает с 735 при ударе до 1026 МПа при статике, а удельная работа разрушения  $\alpha$  возрастает с 38 при ударе до 141 при статике Дж/см<sup>2</sup> (табл. 8).

При ударе пластичная матрица в армопластике увеличивает деформацию  $\varepsilon$  в  $\sim 2,4$  раза с 0,87 до 2,1 % и удельную работу разрушения  $\alpha$  в  $\sim 2,6$  раза с 38 до 99 Дж/см<sup>2</sup> (табл. 8). Пластичная матрица по сравнению с жёсткой матрицей несколько увеличивает прочность  $\sigma$  армопластиков при ударе в  $\sim 1,2$  раза с 735 (жёсткая матрица) до 896 (пластичная матрица) МПа.

Таблица 8

Свойства органопластиков, армированных арамидным волокном Армос® с жёсткой матрицей (ЖМ) при статическом и ударном нагружениях и с пластичной матрицей (ПМ) при ударе

Воздействие	Матрица	$\varepsilon$ , %	$\sigma$ , МПа	$\alpha$ , Дж/см <sup>2</sup>	$\tau$ , МПа
Удар	ЖМ	0,87	735	38	18
Статика	ЖМ	2,73	1026	141	25
Удар	ПМ	2,1	896	99	22

Механизм разрушения КМ при ударе основан на постоянном разрыве и дроблении волокон. Они возникают в наиболее напряжённых волокнах в объёме материала. Разрывы налагаются на растущую деформацию КМ под действием нагрузки от удара. На кривой деформации они появляются в виде пиков или “цилиндрических пружинок” (кривая 1, рис.7).

## Выводы

Удар разрушает КМ с первого момента его действия. Разрываются наиболее нагруженные филаменты волокна. Их разрыв вызван отсутствием



релаксации напряжений в КМ за короткое время действия удара 1 - 2 мс. При разрыве волокон выделяется упругая энергия, которая проявляется в виде пиков колебания нагрузки на кривой деформации. Разрывы и дробление волокон сопровождают деформацию КМ вплоть до его полного разрушения. Такой характер разрушения имеют как КМ с жёсткими углеродными волокнами, так и КМ с более эластичными арамидными волокнами Армос®.

В отличие от удара статическая нагрузка со скоростью 5 мм/мин плавно увеличивает деформацию до разрушения КМ. Кривая деформации гладкая без пиков колебания нагрузки от разрушения КМ. Такая деформация характерна для КМ как с жёсткой, так и с пластичной матрицей.

Энергия, необходимая для разрушения КМ ударом, в несколько раз меньше, чем при статической деформации и разрушении. Удельная работа разрушения углепластиков с жёсткой матрицей существенно снижается с 48 Дж/см<sup>2</sup> при статике до 14 Дж/см<sup>2</sup> при ударе, поэтому для их разрушения при ударе необходима работа в ~ 3,4 раза меньшая, чем при статике.

Деформация КМ при ударе резко уменьшается. Углепластик с жёсткой матрицей разрушается при деформации в ~ 4,5 раза меньшей (0,47 и 2,1 % при ударе и статике), и пластичной матрицей в ~ 3,8 раза меньшей, чем при статике (1,7 и 6,5 % при ударе и статике).

Выбор КМ для создания конструкций, исходя только из статических свойств материала, не гарантирует ударопрочность и ударостойкость конструкций при низкоскоростном ударе.

## Литература

1. Симамура С., Синдо А., Коцука К., Цутияма Н., Сато Т., Ито Ё., Игэками К., Ямада К., Сакамото А., Ватанабэ Ё., Такэда Х., Исикава Т., Сакаки В., Абэ Я. Углеродные волокна / Под ред. С. Симамуры: Пер. с яп. Ю.М. Товмасына / Под ред. Э.С. Зеленского. - М.: Мир, 1987.- 304 с.
2. Кудинов В.В., Крылов И.К., Мамонов В.И., Корнеева Н.В. Увеличение ударной вязкости углепластиков гибридизацией упрочняющих волокон. Физика и химия обработки материалов, 2016, № 1, с. 64 - 67.
3. Кудинов В.В., Крылов И.К., Мамонов В.И., Корнеева Н.В. Нанокристаллические СВМПЭ-волокна, активированные плазмой для КМ // Сб. Материалов VI Всероссийской конф. по наноматериалам с элементами научной школы для молодежи (НАНО 2016). Ноябрь, 22-25, 2016, Москва. - М.: ИМЕТ РАН, 2016, (USB).
4. Корнеева Н.В., Кудинов В.В., Баженов С.Л., Солодилов В.И., Павловский Д.В., Зеленский Э.С. Новые возможности получения композитных материалов, армированных высокопрочными высокомолекулярными полиэтиленовыми волокнами. Механика композитных материалов, 2002, т. 38, № 6, с. 837-846. DOI: [10.1023/A:1021734811034](https://doi.org/10.1023/A:1021734811034)

5. Кудинов В.В., Крылов И.К., Корнеева Н.В., Мамонов В.И. Оценка динамических свойств армированных пластиков. Физика и химия обработки материалов, 2014, № 6, с. 63 – 67.
6. V.V. Kudinov, N.V. Korneeva, “Properties of fiber reinforced plastics about static and dynamic loadings” in AIP Conf. Proc. 1736 - Proc. of the 8<sup>th</sup> International Conference Times of Polymers & Composites (TOP), Ischia, Italy, 19 June (2016). <http://dx.doi.org/10.1063/1.4950937>
7. N.V. Korneeva, V.V. Kudinov, I.K. Krylov, V.I. Mamonov. Properties of fiber reinforced plastics about static and dynamic loading conditions // Polymer Engineering and Science. – 2017. – DOI: [10.1002/pen.24607](https://doi.org/10.1002/pen.24607)
8. Кудинов В.В., Шаехов М.Ф., Корнеева Н.В. Метод оценки физико-химического взаимодействия между волокном и матрицей при получении композиционных материалов, армированных высокопрочными высокомолекулярными полиэтиленовыми волокнами. Физика и химия обработки материалов, 2005, № 6, с. 58 – 61.
9. Сергеева Е.А., Корнеева Н.В., Зенитова Л.А., Абдуллин И.Ш. Модификация синтетических волокнистых материалов и изделий неравновесной низкотемпературной плазмой. Часть 2. Свойства, структура и технологии. – Казань: Изд-во КГТУ, 2011. – 254с.
10. Kudinov V.V., Korneeva N.V., Abdullin I.Sh. “The effect of the bonding between the HPPE fiber and the matrix on the properties and the fracture mode of the polymeric composite materials” in Proc. of the 18<sup>th</sup> Int. Conf. on Composite Materials (ICCM-18). – Island of Jeju, Republic of South Korea, 21 -26 August, 2011. - Seul: Ed. by Korean society of composite materials, 2011. – Paper AF 253 (USB). Full Proceedings Available Online: [www.iccm-central.org/Conferences.html](http://www.iccm-central.org/Conferences.html)