

УДК 517.518.244; 539.387; 608.01.536.21; 677.024.1; 678.01:53:544

doi: 10.53816/20753608_2025_1_60

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ КОМПОЗИТНЫХ И ТЕКСТИЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ОЦЕНКИ ИХ ПРЕДЕЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК**

**APPLICATION OF MATHEMATICAL PROCESSING METHODS
OF THE RESULTS OF TESTED COMPOSITE AND TEXTILE MATERIALS
TO ASSESS THEIR LIMITING CHARACTERISTICS**

Чл.-корр. РАРАН В.А. Анискович, М.И. Марченко, чл.-корр. РАРАН А.Ф. Разин, Р.Р. Саегалиев

ЦНИИСМ

V.A. Aniskovich, M.I. Marchenko, A.F. Razin, R.R. Saetgaliev

В статье предложен аналитический аппарат, позволяющий оперативно получить механические характеристики композитных и текстильных материалов. Проведены оценки сдвиговых составляющих и предельных температур сохранения механических свойств материалов.

Построена зависимость между скоростью пробития (прокола), свойствами поражающего элемента и характеристиками волокон материала защитной структуры.

Ключевые слова: межслойный сдвиг, теория Тимошенко, аппроксимирующая функция, термомеханическая кривая, анализ размерностей, графические зависимости, баллистическая характеристика.

The article proposes an analytical apparatus that makes it possible to quickly obtain mechanical characteristics of composite and textile materials. Estimates of shear components and limiting temperatures of preservation of mechanical properties of materials are carried out.

A relationship between the penetration rate (puncture), the properties of striking elements and the characteristics of the fibers of the protective structure material is constructed.

Keywords: interlayer shift, Timoshenko theory, approximating function, thermomechanical curve, dimension analysis, graphic dependencies, ballistic characteristic.

При проектировании конечных конструкций на основе композитных и текстильных материалов требуются значительные материальные и временные затраты для оценки физико-механических свойств этих материалов. Поэтому зачастую возникает необходимость в оперативном получении искомых данных без использования дорогостоящего оборудования и соответствующих ему образцов материалов для проведения испытаний. Одним из путей решения данной проблемы является использование косвенных

(непрямых) видов испытаний на имеющемся оборудовании с последующей математической обработкой полученных результатов.

Целью данной работы является поиск адекватного решаемым задачам аналитического аппарата, позволяющего оценить такие характеристики композитных материалов (КМ), как модуль межслойного сдвига и термомеханические свойства, а также баллистическую стойкость текстильной брони путем математической обработки результатов испытаний, полученных

на имеющемся в лаборатории АО «ЦНИИСМ» оборудовании.

Определение модуля межслойного сдвига на образцах КМ

Основной проблемой при определении модуля межслойного сдвига является реализация в образце напряженного состояния чистого сдвига, в частности в направлении, перпендикулярном плоскости слоев. В литературе приведены исследования по определению модуля межслойного сдвига посредством испытаний на трехточечный и четырехточечный изгибы, путем изготовления и испытаний образцов крестообразной формы, а также предложены различные варианты математической обработки результатов испытаний [1, 2, 16].

Так, например, по ГОСТ Р 56799–2015 для определения модуля сдвига только одного образца необходимо как минимум два тензодатчика, стоимость каждого из которых на европейском рынке около 8–10 евро. Для надежного установления значений этой характеристики требуется, как правило, не менее пяти образцов, что составляет значительные затраты даже без учета издержек на подготовку образцов и наклейку тензодатчиков. На практике же наиболее часто модуль межслойного сдвига определяют при испытаниях на трехточечный изгиб, так как он отличается простотой и экономичностью. Образец подвергается изгибающему моменту. Изгибающий момент увеличивается с постоянной скоростью в двух опорных точках от нуля до максимума заданной нагрузки [13–15].

В соответствии с ГОСТ 25.604–82, при определении модуля изгиба регламентированное расстояние между опорами должно быть не менее 40 толщин образца. При испытании на трехточечный изгиб одного и того же образца материала с меньшими расстояниями между опорами (базами) можно заметить, что значение измеряемого модуля упругости снижается с уменьшением базы. Это объясняется тем, что повышается влияние сдвиговых деформаций на прогиб и измеренный модуль изгиба становится «условным». Чем меньше отношение расстояния между опорами L к толщине образца h ($L/h \ll 40$), тем больше вклад сдвиговой составляющей. Качественная картина результатов испытаний с различными значениями L/h представлена на рис. 1.

Для определения сдвиговых характеристик материалов воспользуемся теорией Тимошенко [3]. Модуль упругости при изгибе связан с измеряемым «условным» модулем E_y соотношением:

$$\frac{1}{E_y} = \frac{\alpha_0}{G} \cdot \frac{h^2}{L^2} + \frac{1}{E_n}, \quad (1)$$

где E_n — истинный модуль упругости при изгибе;
 G — модуль межслойного сдвига;
 α_0 — коэффициент, зависящий от формы сечения образца (для образца с прямоугольным сечением равен 6/5);
 L — расстояние между опорами (база);
 h — толщина образца.

Формула (1) представляет собой линейное уравнение вида $y = ax + c$, содержащее две неизвестные величины $a = \alpha_0/G$ и $c = 1/E_n$. Определить их возможно графическим способом после

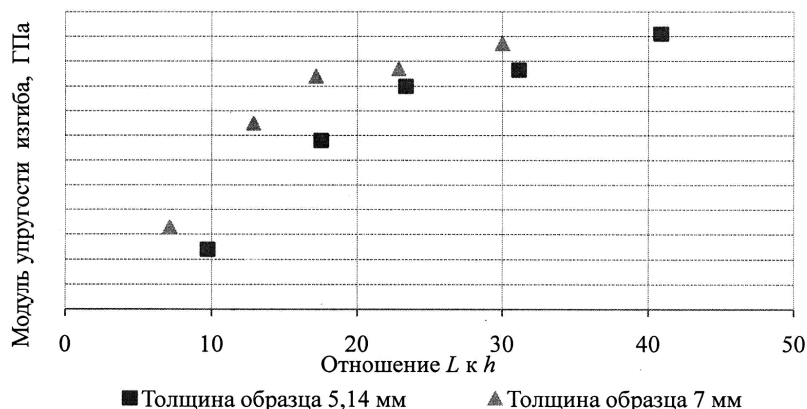


Рис. 1. Диаграммы зависимостей модуля упругости при трехточечном изгибе

проведения серии испытаний на одинаковых образцах с различными базами. Каждое значение h_2/L_2 будет координатой x , а обратное значение измеренного «условного» модуля упругости $1/E_y$ будет координатой y . По полученным точкам строится линия тренда (линейная) методом наименьших квадратов (рис. 2).

Точка, пересекающая ось ординат, соответствует переменной c равной $1/E_{и}$, а угол наклона к оси абсцисс — угловой коэффициент a , равный $\text{tg}(\alpha_0/G)$. Для реализации способа и надежного построения кривой необходимо иметь не менее 5 экспериментально определенных значений.

В лаборатории физико-механических испытаний АО «ЦНИИСМ» были проведены испытания по определению модуля межслойного сдвига на образцах стеклопластика, изготовленного на основе стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭД-20, длиной 230 мм, толщиной 7 мм при нагружении трехточечным изгибом на базах 50, 90, 120, 160 и 210 мм. Эксперименты проводились на испытательной машине типа FP-10/1 VEB Thüringer Industrierwerk. Конструкция машины позволяет устанавливать расстояние между опорами при испытаниях на трехточечный изгиб не более 210 мм.

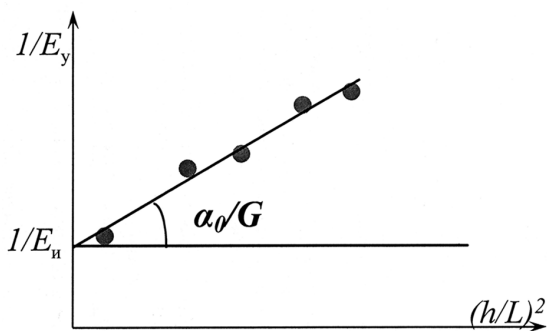


Рис. 2. Зависимость измеряемого «условного» модуля упругости E_y от базы L

«Условный» модуль E_y изгиба рассчитывался по формуле

$$E_y = \frac{\Delta P \cdot L^3}{4b \cdot h^3 \cdot \Delta \omega},$$

где ΔP — приращение нагрузки;

$\Delta \omega$ — приращение прогиба посередине образца;

b — ширина образца;

h — толщина образца;

L — расстояние между опорами (база).

Результаты проведенных испытаний на трехточечный изгиб приведены в табл. 1.

Графическая зависимость «условного» модуля изгиба от базы с построением линейной аппроксимации Z представлена на рис. 3.

Прямая Z пересекает ось ординат в точке $1/E_{и} = 0,058$, а $\text{tg}(\alpha_0/G) = 17,92$, откуда находим истинный модуль изгиба и модуль межслойного сдвига $E_{и} = 17,2$ ГПа и $G = 792,1$ МПа.

Для подтверждения полученного значения G были проведены аналогичные испытания образцов данного материала разной толщины на выбранных базах, результаты которых представлены в табл. 2. Анализируя результаты проведенных испытаний можно сделать вывод, что модуль межслойного сдвига качественно не зависит от толщины испытуемого образца, разброс значений составляет менее 2 %.

Также вычисление упругих характеристик проведено в академической версии конечно-элементного пакета ANSYS с использованием встроенного модуля Material Designer. Была построена модель испытания на изгиб для стеклопластика Eроху E-Glass UD, близкого по своим характеристикам к стеклопластику на основе стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭД-20, на базах 50, 90, 120, 160 и 210 мм.

Таблица 1

Значения «условного» модуля изгиба для испытанных образцов при различных базах

Расстояние между опорами (база) L , мм	Отношение L/h	Отношение $(h/L)^2$, ось x	«Условный» модуль упругости E_y , ГПа	Значение $1/E_y$, ось y
210	30,0	0,00111	11,1	0,0904121
160	22,9	0,00191	9,7	0,1035899
120	17,1	0,00340	9,0	0,1112720
90	12,9	0,00605	6,8	0,1462755
50	7,1	0,01960	2,4	0,4158613

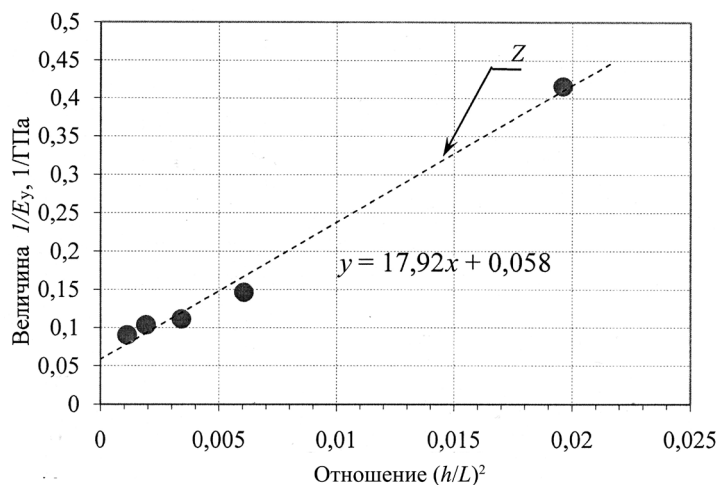


Рис. 3. Зависимость измеряемого «условного» модуля упругости E_y от расстояния L между опорами и толщины h образца

Таблица 2

Результаты определения модуля межслойного сдвига при испытаниях разнотолщинных образцов стеклопластика, выполненного на основе стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭД-20

№ п/п	Толщина образца h , мм	Среднее значение модуля межслойного сдвига G , МПа
1	3	797,9
2	5	787,5
3	7	792,1
4	9	798,3

Проведена математическая обработка численного эксперимента и получено значение модуля межслойного сдвига $G = 790,9$ МПа. Сравнительный анализ результатов испытаний образцов стеклопластика на основе стеклоткани Т-10-14 со связующим ЭД-20 и расчетов модели в ANSYS для стеклопластика Epoxy E-Glass UD показал удовлетворительную сходимость значений модуля межслойного сдвига (различие менее 1%).

Определение термомеханических свойств

Одним из наиболее эффективных средств, позволяющих исследовать свойства материалов и процессов, протекающих в них при изменении температуры, является метод термического анализа [4].

Для определения предельных температур, при которых изделие из КМ может использоваться по своему назначению, необходим контроль термомеханических свойств и оценка его теплостойкости [5]. Большинство полимерных

материалов, используемых в качестве связующего, при нагревании переходят из стеклообразного состояния в пластичное. Это вызывает значительное снижение механических характеристик полимерной матрицы и КМ в целом.

Сущность метода испытаний заключается в получении термомеханической кривой, отражающей зависимость изменения силы сопротивления образца поперечному трехточечному изгибу от температуры, и определении на полученной кривой точек перехода материала из стеклообразного в эластичное состояние. Для этого образец, установленный в горизонтальных опорах на испытательной машине, нагружают заданной изгибающей поперечной нагрузкой, которую контролируют с помощью датчика силы, соответствующий этой нагрузке прогиб фиксируют, и осуществляют нагрев с заданным темпом роста температуры.

По мере нагрева жесткость образца снижается (происходит размягчение полимерной матрицы) и, следовательно, снижается приложенная к нему нагрузка. В процессе испытания

регистрируют значение температуры, соответствующее ей значение нагрузки, и рассчитывают модуль упругости.

В настоящей статье предложен способ математической обработки термомеханических кривых, полученных при испытаниях КМ, путем построения аппроксимирующих функций.

Анализ степени адекватности аппроксимирующей функции реальному процессу проведен на примере термомеханических кривых образцов стеклопластика и органопластика с помощью графического представления зависимостей, имеющих сложный нелинейный характер [6]. Поскольку, исходя из опыта, термомеханические кривые имеют S-образную форму, то в качестве аппроксимирующих функций были выбраны полином третьей степени и сигмоида. Для определения показателя степени связи двух величин был рассчитан коэффициент корреляции для каждой аппроксимации.

Анализ результатов экспериментальных данных показал, что наибольший коэффициент корреляции 0,99 имеет аппроксимирующая функция типа сигмоида, которая и может быть положена в основу анализа термомеханической кривой.

Конечным результатом оценки термомеханических свойств образцов КМ является температурный диапазон между значением начала перехода в пластичное состояние $t_{\text{ни}}$ и значением верхнего предела $t_{\text{вп}}$ работоспособности материала (сохранения механических свойств).

Для получения искомых характеристик находятся зависимости скорости изменения модуля упругости от повышения температуры и ускорения этого изменения, то есть первая и вторая производные аппроксимирующей сигмоиды с определением экстремумов этих производных.

Минимум первой производной соответствует температуре верхнего предела работоспособности материала $t_{\text{вп}}$, а минимум второй производной функции — температуре начала перехода $t_{\text{ни}}$ из стеклообразного в эластичное состояние.

В физико-механической лаборатории АО «ЦНИИСМ» на испытательной машине типа УТС 110М-100 1-У проведены термомеханические испытания образцов стеклопластика на основе ткани ТСУ со связующим ЭХД-У и органопластика на основе нитей Руслан со связующим ЭХД-МД методом поперечного изгиба.

Массивы определенных в эксперименте значений модулей упругости $E(t)$ от температуры являются основой для термомеханических кривых. Для каждого материала построим сигмоиду $S(t)$, которая наиболее точно описывает и аппроксимирует экспериментальные точки термомеханической кривой $E(t)$.

Построим кривые первой и второй производной $S(t)$ методом наименьших квадратов (рис. 4).

На рис. 4 видно, что процесс размягчения для каждого материала индивидуален и захватывает температурный диапазон различной ширины. Для испытанных образцов стеклопластика на основе ткани ТСУ со связующим ЭХД-У температура начала перехода $t_{\text{ни}} = 108$ °С, а температура верхнего предела работоспособности $t_{\text{вп}} = 117$ °С, для испытанных образцов органопластика на основе нитей Руслан со связующим ЭХД-МД соответственно $t_{\text{ни}} = 122$ °С, $t_{\text{вп}} = 126$ °С.

Проведен анализ значений, обусловленных возможной погрешностью измерений экспериментальных точек термомеханической кривой в пределах ± 5 %. Для модулей упругости, соответствующих температуре верхнего предела работоспособности $t_{\text{вп}}$ каждого материала, проведены расчеты разброса указанной температуры $t_{\text{вп}}^{-5}$ и $t_{\text{вп}}^{+5}$. Графические результаты представлены на рис. 5.

Результаты выполненных исследований показывают, что при погрешности в получении точек термомеханической кривой ± 5 % максимальный разброс $t_{\text{вп}}$ незначителен, более 2 °С. Таким образом, предложенный метод позволяет достаточно объективно и точно определить предел работоспособности композитного материала при повышенных температурах.

Оценка баллистических свойств текстильной брони

Одной из важных задач, решаемых при разработке новых образцов броневых структур, является оценка (прогнозирование) защитных характеристик материалов, используемых для их изготовления, на ранних этапах проектирования. Как правило, баллистические характеристики бронепакета при его разработке или модификации определяются дорогостоящими стрелковыми испытаниями.

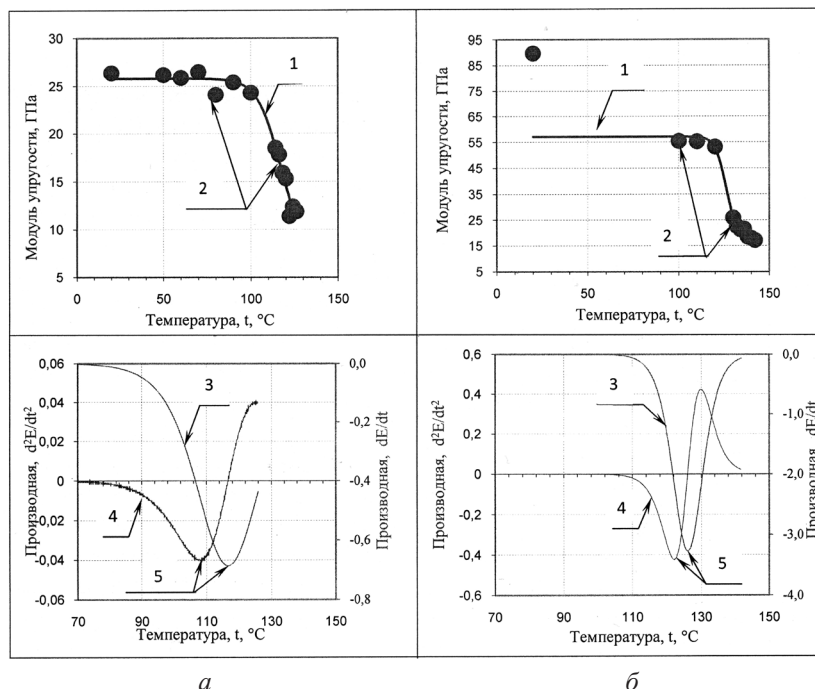


Рис. 4. Расчетная термомеханическая кривая с зависимостями первой и второй производной от температуры: а — стеклопластик на основе ткани ТСУ со связующим ЭХД-У; б — органопластик на основе нитей Руслан со связующим ЭХД-МД.

1 — аппроксимация термомеханической кривой; 2 — экспериментальные значения; 3 — I производная функции, аппроксимирующей термомеханическую кривую; 4 — II производная функции, аппроксимирующей термомеханическую кривую; 5 — точка минимумов

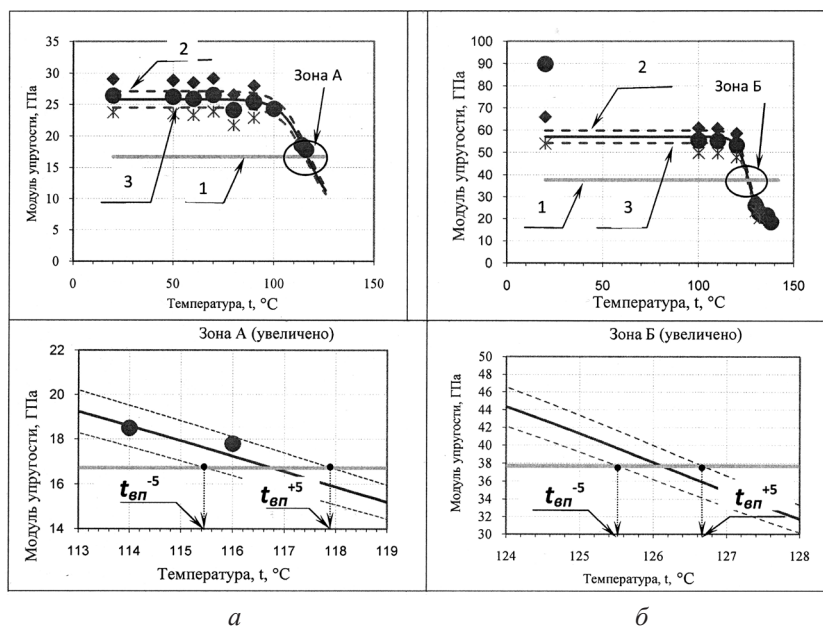


Рис. 5. Зависимость разброса температуры верхнего предела работоспособности от уровня погрешности измерений модуля упругости: а — стеклопластик на основе ткани ТСУ со связующим ЭХД-У; б — органопластик на основе нитей Руслан со связующим ЭХД-МД.

1 — линия модуля упругости, соответствующего температуре верхнего предела работоспособности материала; 2 — кривая, аппроксимирующая 5%-ное повышение значений термомеханической кривой; 3 — кривая, аппроксимирующая 5%-ное понижение значений термомеханической кривой

Анализ отечественных и зарубежных литературных источников [7–10] показывает, что при оценке баллистических характеристик текстильных материалов учитываются физико-механические характеристики тканей и многослойного бронепакета на основе этих тканей, но не принимаются в расчет механические свойства арамидных волокон.

Разработка размерно-эквивалентных соотношений между скоростью пробития (прокола), свойствами поражающего элемента и характеристиками волокон, на основе которых изготовлена защитная структура, полезна для оптимизации конструкции.

Для того чтобы связать в одну систему механические свойства волокон, из которых состоит текстильная броня, ее поверхностную плотность, скорость $V_{50\text{нпрб}}$ (скорость, при которой поражающие элементы пробивают броню в 50 % случаев, далее по тексту — V_{50}) и характеристики индентора (поражающего элемента), воспользуемся таким способом обработки данных, как анализ размерностей. В России основоположником анализа размерностей стал академик Н.А. Морозов, который заметил, что «по двум-трем соотношениям между физическими величинами можно математическим путем определить и все остальные соотношения...» [11].

Анализ размерностей — инструмент, используемый в физике, химии, технике для построения обоснованных гипотез о взаимосвязи различных параметров сложной системы. Суть метода заключается в нахождении соотношения между физическими величинами, существенными для исследуемого процесса или явления. Основное положение метода — любое уравнение должно быть размерно однородным. Для поиска выражения одного из параметров исследуемой системы через другие составляются соотношения, имеющие нужную размерность, часто они и оказываются искомым уравнением (с точностью до безразмерного множителя).

При исследовании зависимостей между параметрами нашей сложной системы необходимо определить основополагающий перечень характеристик. Важнейшими механическими характеристиками волокна определим удельную работу по разрыву волокна и модуль упругости при растяжении; для поражающего элемента основными являются площадь наконечника и

масса; для защитной структуры на основе исследуемого волокна — скорость V_{50} и ее поверхностная плотность. Для упрощения определяющих соотношений будем считать, что поведение материала при его растяжении поперек волокон, а также при его сжатии вдоль волокон является линейно-упругим вплоть до разрушения (ввиду малости деформаций в обоих указанных случаях).

Составим систему из перечисленных физических величин:

$$A(R, E, S_p, m_p, V_{50}, \rho_s) = 0,$$

где $R = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2\rho}$ — удельная работа по разрыву волокна;

σ — прочность при разрыве;

ε — деформация волокна при разрыве;

ρ — плотность волокна;

E — модуль упругости волокна при растяжении;

S_p — площадь сечения поражающего элемента;

m_p — масса поражающего элемента;

V_{50} — баллистический предел;

ρ_s — поверхностная плотность защитной структуры.

Так как задача состоит в определении взаимосвязи баллистических характеристик бронепакета со свойствами волокон, объединим эти параметры в одну группу (R, E, V_{50}) , а ко второй группе отнесем поверхностную плотность защитной структуры на основе этого волокна и характеристики поражающего элемента (S_p, m_p, ρ_s) .

Для достижения нулевой размерности в первой группе параметров используем формулу определения скорости звука в волокне — $\sqrt{\frac{E}{\rho}}$, тогда соотношение характеристик первой группы будет

$$\frac{V_{50}}{\left(\frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2\rho} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}\right)^{1/3}},$$

а для второй группы соответственно

$$\frac{\rho_s \cdot S_p}{m_p}.$$

Таблица 3

Механические свойства волокон

Волокно	σ , МПа	ε , %	E , МПа	ρ , кг/м ³	$K^{1/3}$, м/с
РУСЛАН-ВМ-600-I-K	4,4	3,0	137	1450	763
ПЭ-2	3,6	2,9	140	900	898
СВМ 58,8(300)*17-1000-ВО	3,7	2,8	120	1400	700
Русар-С	5,2	2,5	152	1450	771

Обозначим $K = \frac{\sigma \cdot \varepsilon}{2\rho} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ — произведение

удельной работы по разрыву волокна и скорости звука в волокне. Искомое уравнение приобретет следующий вид:

$$A \left(\frac{V_{50}}{K^{1/3}}, \frac{\rho_S \cdot S_P}{m_P} \right) = 0. \quad (2)$$

Оба параметра уравнения (2) безразмерные.

В табл. 3 представлены экспериментально полученные механические свойства волокон некоторых материалов, необходимые для расчета значения K в анализе размерности.

В рамках работ по определению скорости V_{50} для защитных структур из материала на основе нити Русар-С с разной поверхностной плотностью были проведены баллистические испытания путем обстрела шариком 1,03 г, результаты которых представлены в табл. 4 [12]. В качестве параметра $K^{1/3}$ в расчетах участвует значение из табл. 3 для исследуемого материала.

Графическое решение уравнения (2) в виде зависимости между данными параметрами можно наблюдать на координатной плоскости, где

по оси ординат отметим первый параметр уравнения (2), а по оси абсцисс — второй параметр уравнения (2). Для получения достоверной картины необходимо не менее 5 точек. По отмеченным точкам строится аппроксимирующая непрерывная кривая. Уравнение этой кривой покажет численную зависимость параметров нашего анализа размерности.

На рис. 6 графически представлена зависимость параметров бронепакета на основе нити Русар-С, для наглядности к значениям по оси абсцисс добавлен множитель 100.

Для исследуемого материала аппроксимирующая кривая представляет собой степенную функцию. Следовательно, при любой модификации текстильной брони из материала на основе нити Русар-С, изменяя значение поверхностной плотности, по уравнению кривой, аппроксимирующей отмеченные точки, можно рассчитать скорость V_{50} .

Следовательно, при модификации текстильных структур с определенными физико-механическими свойствами волокон и известными результатами баллистических испытаний (не менее 5) на этих структурах с различной поверхностной плотностью, не прибегая к дополнительным стрельбам,

Таблица 4

Исходные данные для построения точек по уравнению (2) для материала Русар-С

№ п/п	Поверхностная плотность бронепанели, ρ_S , кг/м ²	Безразмерный параметр $\rho_S \cdot S_P / m_P$	V_{50} , м/с	Безразмерный параметр $V_{50} / K^{1/3}$
1	0,2	0,0060	291	0,377
2	2,0	0,0603	530	0,687
3	3,0	0,0905	580	0,752
4	4,0	0,1206	630	0,817
5	5,0	0,1508	680	0,882
6	6,0	0,1810	715	0,927
7	7,0	0,2111	750	0,972

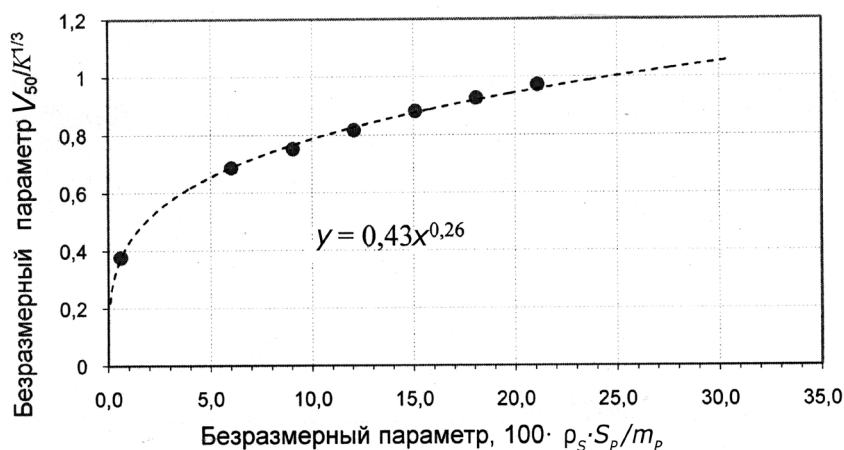


Рис. 6. Пример связи параметров в системах тканевой брони на основе нити Русар-С

появляется возможность построения корреляционной зависимости для прогнозирования скорости V_{50} . Также появляется возможность решения обратной задачи — расчета требуемой поверхностной плотности защитной структуры для заданного значения V_{50} .

Таким образом, предложенный аналитический аппарат, использующий теорию Тимошенко для вычисления сдвиговых составляющих; аппроксимацию сигмоидой и нахождение ее производных для расчета предельных температур работоспособности материала; анализ размерностей для определения баллистических характеристик тканевой брони, позволяет путем математической обработки результатов испытаний оперативно и достоверно оценить значимые для разработчика механические характеристики композитных и текстильных материалов.

Выводы

1. Определено значение модуля межслойного сдвига стеклопластика на основе стеклоткани Т-10-14 и связующего ЭД-20 путем математической обработки результатов испытаний разнотолщинных образцов на трехточечный изгиб. Показано, что толщина образца качественно на сдвиговые характеристики не влияет, разброс значений составляет менее 2 %.

2. В академической версии пакета ANSYS построена модель трехточечного изгиба и выполнен расчет модуля межслойного сдвига стеклопластика Ероху E-Glass UD (близкого по характеристикам к испытанному), показана

удовлетворительная сходимость значений модуля межслойного сдвига испытанных образцов и полученного в пакете ANSYS (различие менее 1 %). Таким образом, для оперативной оценки модуля межслойного сдвига возможно использование пакета ANSYS при наличии материалов — аналогов во встроенном модуле Material Designer.

3. Установлены предельные температуры работоспособности определенных видов стеклопластика и органопластика путем построения адекватной аппроксимирующей функции. Показан минимальный разброс температуры верхнего предела сохранения механических характеристик испытанных материалов (немногим более 2°C) при погрешности измерений экспериментальных данных в пределах ± 5 %. Предложенный способ математической обработки результатов испытаний можно применять к любым КМ с полимерной матрицей, поскольку физико-механические и термомеханические процессы при повышенных температурах этих материалов подобны.

4. Определен набор характеристик, необходимых для разработчиков защитных структур на текстильной основе для прогнозной оценки защитных свойств, и построена зависимость между характеристиками волокна Русар-С, параметрами поражающего элемента и скоростью V_{50} . Стало возможным прогнозирование баллистических свойств текстильных структур на основе физико-механических свойств волокон, и предложен метод оценки требуемой поверхностной плотности конкретной защитной структуры для заданного значения V_{50} .

Список источников

1. ГОСТ Р 56799–2015. Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при сдвиге на образцах с V-образными надрезами. М.: Стандартинформ, 2016. 23 с.
2. Тарнопольский Ю.М., Кинцис Т.Я. Методы статических испытаний армированных пластиков. М.: Химия, 1981. 272 с.
3. Тимошенко С.П. Сопротивление материалов. Т. 1. М.: Наука, 1965. 364 с.
4. Атясова Е.В. Оптимизация рецептурно-технологических параметров, обеспечивающих максимальную теплостойкость полимерных композитов, определяемую усовершенствованными методами термомеханических испытаний; дисс. на соис. уч. степ. канд. техн. наук. Бийск, 2016. 120 с.
5. Ходакова Н.Н., Самойленко В.В., Блазнов А.Н., Бычин Н.В. Термоаналитические исследования полимерного композиционного материала // Ползуновский вестник. 2016. Т. 1. № 4. С. 218–224.
6. Звонарев С.В. Основы математического моделирования: учеб. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2019. 112 с.
7. Харченко Е.Ф. Композитные, текстильные и комбинированные бронематериалы. Том 2. Современные защитные структуры и средства индивидуальной бронезащиты. М., 2014. 332 с.
8. Морозова Т.В., Дворцевая А.М., Купрянова Е.В., Осипчик В.С. Исследование перспективных арамидных волокон Русар-С в средствах индивидуальной бронезащиты // Успехи в химии и химической технологии. Т. XXXIII. 2019. № 6. С. 65–68.
9. Железина Г.Ф., Соловьева Н.А., Орлова Л.Г., Войнов С.И. Баллистически стойкие арамидные слоисто-тканые композиты для авиационных конструкций // Все материалы. Энциклопедический справочник. Композиционные материалы. 2012. № 12. С. 23–26.
10. Naik N.K., Shrirao P., Reddy B.C.K. Ballistic impact behaviour of woven fabric composites: Formulation. International Journal of Impact Engineering 32 (2006). Pp. 1521–1552.
11. Рожков М. Н.А. Морозов — основоположник анализа размерности // Успехи физических наук. 1953. Том XLIX. Вып. 1. С. 180–181.
12. Слугин А.И., Николаев С.Д., Фомин Б.М., Николаев А.С. Исследование баллистических свойств тканевых бронепакетов // Технология текстильной промышленности. 2011. № 6 (335). С. 56–59.
13. Блазнов А.Н., Атясова Е.В., Самойленко В.В. Анализ методов термомеханических испытаний композитных материалов и сравнения результатов // Южно-сибирский научный вестник. 2017. № 1(17). С. 54–69.
14. Новосад Т.Н., Сташева М.А., Гойс Т.О. и др. Анализ и перспективы развития цифровых методов измерения показателей свойств текстильных материалов и изделий // Технология текстильной промышленности. 2023. № 3 (405). С. 15–33.
15. Карева Т.Ю., Мирошниченко Д.А., Толубеева Г.И. и др. Поиск путей совершенствования цифрового представления текстильных материалов с целью обнаружения дефектов // Известия вузов. Технология текстильной промышленности. 2022. № 2. С. 104–108.
16. Математические методы в проектировании и оценивании качества текстильных материалов и изделий: современное состояние проектирования и оценивания качества потребительской продукции, выделение и установление значимости качественных и количественных характеристик продукции экспертными и аналитическими методами, определение фактических и нормативных значений показателей качества продукции инструментальными и статистическими методами, совершенствование нормативной оценки качества продукции с использованием методов квалиметрии / М.А. Лысова [и др.]. Иваново: Ивановская гос. текстильная акад., 2012. 251 с.