

УДК 539.3

П.А. МОССАКОВСКИЙ¹, М.Е. КОЛОТНИКОВ², Ф.К. АНТОНОВ²¹Научно-исследовательский институт механики МГУ, Москва, Россия²ФГУП «ММПП «Салют», Москва, Россия

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОБИВАНИЯ МНОГОСЛОЙНОЙ ПРЕГРАДЫ ИЗ ТКАНОГО КОМПОЗИТА С НАНОКОМПОЗИТНОЙ ПРОПИТКОЙ

В статье представлены результаты экспериментально-вычислительного исследования свойств нанокompозитной жидкости (НКЖ) и выполнен сравнительный анализ пробиваемости многослойной преграды из тканого кевларового композита с НКЖ пропиткой и без нее. В качестве НКЖ использовался полиэтиленгликоль, с внедренными в него наночастицами частицами диоксида кремния. Расчеты проводились с использованием нелинейного кода LS-DYNA. По результатам исследования предложена математическая модель НКЖ. Уточнены контактные условия и параметры трения между НКЖ и тканой основой. Обосновано утверждение о возможности представления НКЖ в характерном для ударных взаимодействий диапазоне изменений скоростей деформаций моделью ньютоновской жидкости и определены параметры сдвиговой вязкости и объемной сжимаемости для этой модели. По результатам натурных и виртуальных экспериментов сделан вывод о существенной роли контактных условий между НКЖ и кевларовой основой в механизме увеличения энергоемкости преграды из композиции кевлар+НКЖ. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 09-08-01229-а.

Ключевые слова: удар, пробивание, тканый композит, нанокompозитная жидкость, моделирование.

Введение

Одной из наиболее перспективных конструкций, обеспечивающих удержание фрагментов оборвавшихся лопаток внутри корпуса вентилятора, является конструкция так называемой «мягкой стенки», включающей в себя относительно тонкий металлический корпус с намоткой из композиционных материалов. В настоящее время в авиадвигателестроении в качестве намотки широко применяются тканые кевларовые полотна, обладающие высокими энергопоглощающими характеристиками.

По данным многочисленных экспериментальных исследований [1] защитные свойства преграды, представляющей собой многослойный пакет из кевларового тканого композита, могут быть улучшены без существенного увеличения ее массы путем предварительной пропитки всего пакета нанокompозитной жидкостью. Нанокompозитная жидкость (НКЖ) представляет собой суспензию на основе наночастиц диоксида кремния равномерно внедренных в полимер – полиэтиленгликоль.

При экспериментальном исследовании свойств НКЖ при относительно низких скоростях деформаций ($< 100 \text{ с}^{-1}$) с использованием стандартных вискозиметров ротационного типа выявлена сложная (реверсивная) зависимость ее вязкости от скорости деформаций [2]. В характерном для ударного взаимодействия диапазоне скоростей деформаций

(500 с^{-1} – 2000 с^{-1}) стандартные подходы измерения вязкости ненадежны. Хотя в литературе принято относить этот материал к классу неньютоновых жидкостей с возрастающей при увеличении скорости деформаций вязкостью, вопрос достоверного определения динамических диаграмм вязкости и, в целом, построения математической модели НКЖ в настоящее время остается открытым.

Разработка оптимальных композиций (кевлар + НКЖ) с точки зрения минимизации массы преграды при сохранении ее защитных свойств не возможна без создания адекватной математической модели взаимодействия ударника с преградой и понимания механизма перераспределения энергии удара в структуре композита. Несмотря на большое число публикаций, посвященных этой теме, на сегодняшний день удовлетворительного описания поведения кевлар + НКЖ композита при высокоскоростном деформировании еще не дано.

В статье представлены результаты экспериментально-вычислительного исследования динамического поведения НКЖ и композиций кевлар + НКЖ, проведенного с целью уточнения математической модели взаимодействия ударника с преградой.

Исследование включало три этапа:

1. Экспериментальное исследование динамических свойств НКЖ.
2. Проведение виртуальных экспериментов для уточнения параметров математической модели НКЖ.

3. Проведение натуральных и виртуальных динамических тестов на пробиваемость для аттестации математической модели композиции кевлар + НКЖ.

1. Натурные эксперименты

Динамические натурные испытания проводились в НИИМ ННГУ сотрудниками лаборатории динамических испытаний материалов. Эксперименты по методике разрезного стержня Гопкинсона

включали две серии испытаний. Первая серия (испытуемый материал в жесткой обойме) – для определения объемной сжимаемости НКЖ (схема экспериментальной установки приведена на рис.1), вторая (в мягкой обойме) – для определения сдвиговой вязкости (рис. 2).

Условия эксперимента выбирались таким образом, чтобы реализовать практически интересующий диапазон изменения скоростей деформаций в НКЖ (от 200 до 2000 с⁻¹).

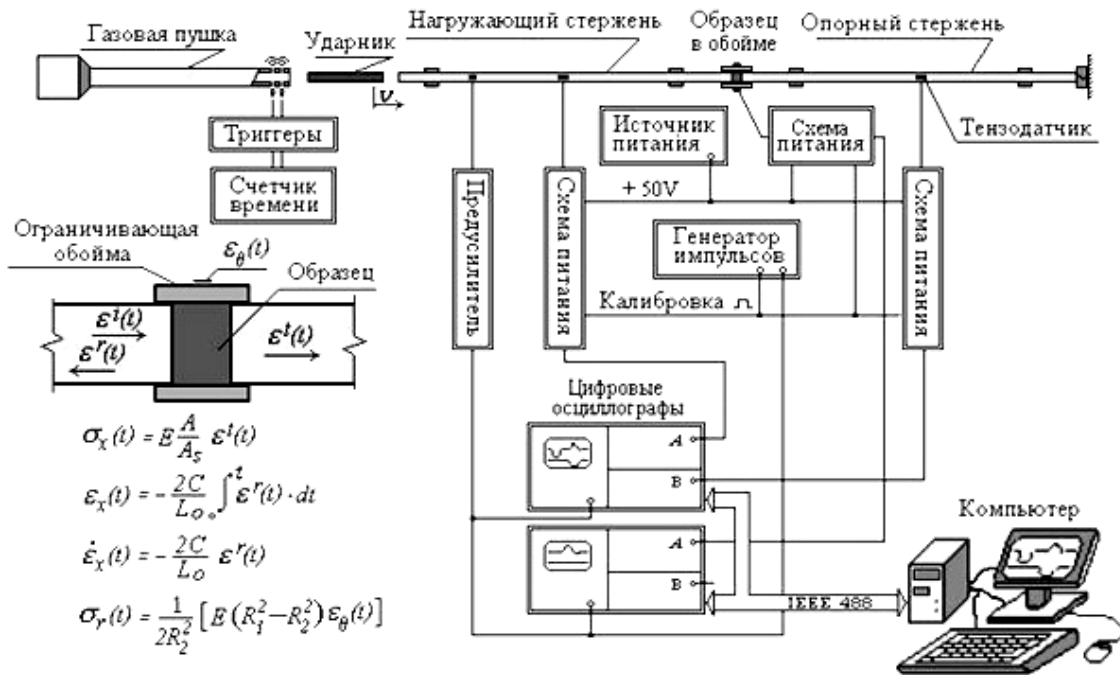


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для определения объемной сжимаемости НКЖ.

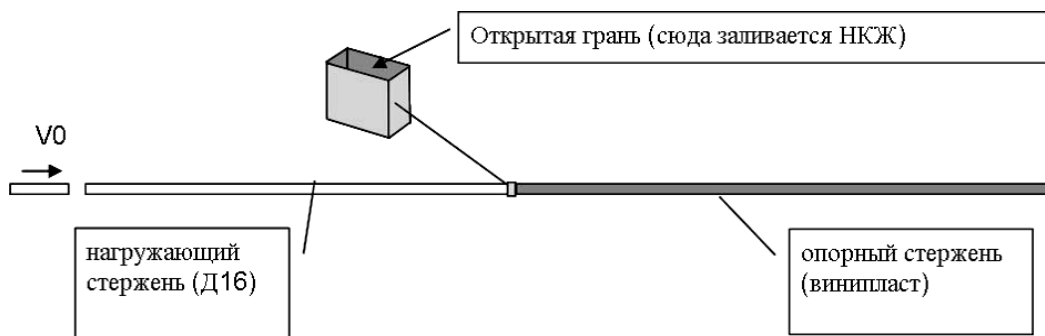


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для определения объемной сжимаемости НКЖ.

Результаты испытаний в жесткой обойме при различных скоростях деформаций от 200 до 2500 с⁻¹ показали, что напряженно-деформированное состояние в образцах соответствует состоянию всестороннего гидростатического сжатия. Экспериментальная диаграмма (рис. 3) связи между измеряемым напряжением и объемной деформацией не зависит от скорости деформации и хорошо аппроксимируется квадратичным соотношением:

$$-p = K_1\theta + K_2\theta^2 \tag{1}$$

где p – гидростатическое давление, θ – объемная деформация, $K_1=767$ МПа, $K_2=3000$ Мпа.

Для исследования сдвиговой вязкости НКЖ проводились эксперименты в мягкой обойме со скоростями деформаций 200, 500, 1000 и 2000 с⁻¹. В силу высокой степени неоднородности НДС в образце в эксперименте для определения динамиче-

ской сдвиговой вязкости была построена компьютерная модель экспериментального стенда и проведены виртуальные эксперименты по той же программе.

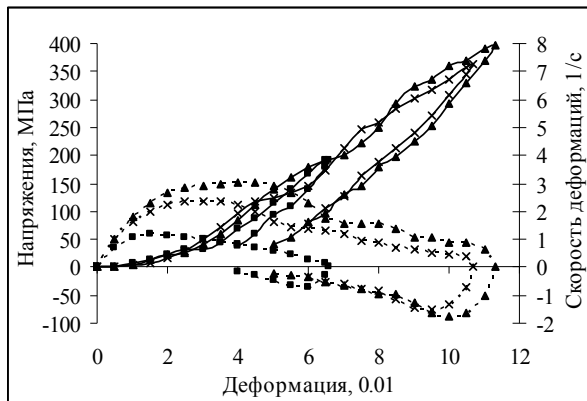
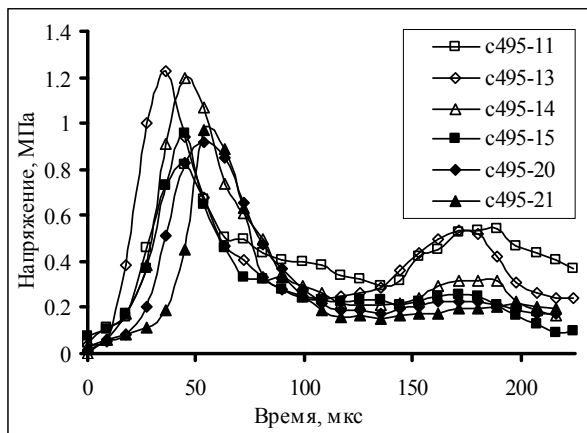
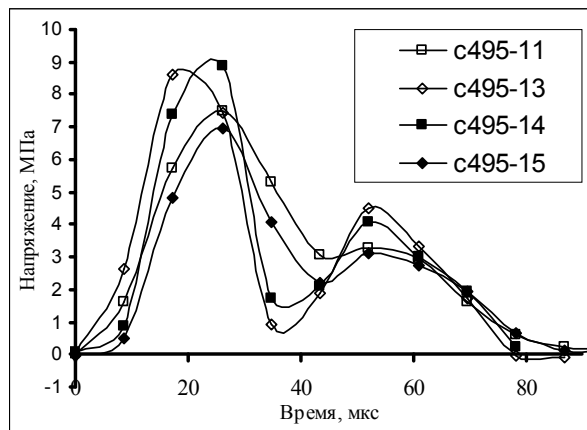


Рис. 3. Экспериментальная диаграмма связи между напряжением и объемной деформацией

На рис. 4 изображены экспериментальные диаграммы напряжения (по показаниям тензометра на опорном стержне) от времени. Характерный пик на графике – следствие высокой начальной неоднородности НДС в образце.



а



б

Рис. 4. Экспериментальные диаграммы напряжения. Скорость деформаций: а – 200 с⁻¹; б – 2000 с⁻¹

2. Виртуальные эксперименты

Виртуальные эксперименты проводились с использованием нелинейного кода LS-DYNA. Для моделирования сдвиговых свойств НКЖ использовалась модель ньютоновой жидкости, записываемая в терминах девиаторов напряжений и скоростей деформаций в виде:

$$s_{ij} = 2\mu\dot{\epsilon}_{ij}$$

Объемная сжимаемость задавалась с использованием квадратичной аппроксимации экспериментальных диаграмм испытаний в жесткой обойме по формуле (1).

Начальное значение сдвиговой вязкости получено путем осреднения секущих модулей $\frac{\sigma}{\epsilon}$ экспериментальных диаграмм испытаний в мягкой обойме, после исключения начального пика напряжений.

Определенные таким образом значения сдвиговой вязкости приведены на рис. 5.

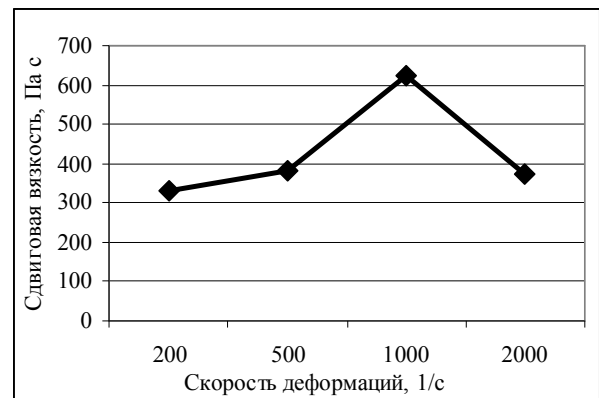


Рис. 5. Зависимость сдвиговой вязкости от скорости деформаций

В силу слабой зависимости сдвиговой вязкости от скорости деформаций в расчетах принималось осредненное значение сдвиговой вязкости равное 400 Па·с.

Программа виртуальных экспериментов состояла из серий расчетов на виртуальном стенде, воспроизводящем натурные испытания с образцами в мягкой обойме при скоростях ударника 7.5, 15 и 30 м/с. При этом для лучшего согласования результатов натурных и виртуальных испытаний дополнительно варьировался коэффициент трения между образцом и стержнями (от 0 до 1).

При проведении виртуальных испытаний использовался лагранжев подход для моделирования НКЖ. Результаты виртуальных испытаний при различных скоростях деформаций при коэффициенте трения, равном 0.1 приведены на рис. 6.

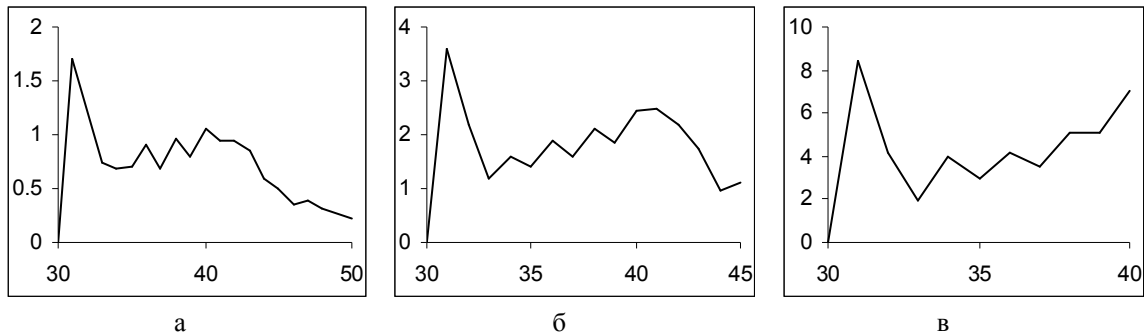


Рис. 6. Диаграммы экспериментальной зависимости напряжений (МПа) от времени (мкс) при различных скоростях деформаций: а – 200 с⁻¹; б – 500 с⁻¹; в – 2000 с⁻¹

3. Баллистические испытания

Для сравнительной оценки энергоемкости (энергопоглощаемость) преград из кевлара и композиции кевлар + НКЖ, а также для уточнения контактных условий между НКЖ и кевларом были проведены натурные и виртуальные тесты на пробиваемость с пропитанной НКЖ и сухой кевларовой преградой. Схема баллистического теста приведена на рис. 7. В табл. 1 приведены параметры ударника, в табл. 2 – протокол ударных испытаний.

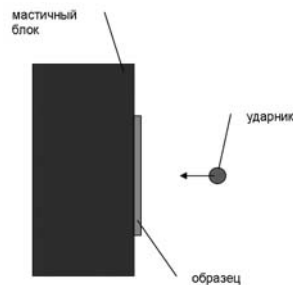


Рис. 7. Схема баллистического теста

Таблица 1

Параметры ударника

ударник	диаметр	масса	объем	плотность
шарик	4.75 мм	3.5 г	452 мм ³	7747 кг/м ³

Таблица 2

Протокол ударных испытаний

№	Скорость, м/с	Давление, атм	Диаметр отпечатка, мм	Глубина отпечатка, мм	примечания
1	89.55	3	12.1	4	контрольный
2	93.75	3	13	3.4	пропитанный
4	90.91	3	12.4	4.3	контрольный
5	85.71	3	12.55	3.2	пропитанный
6	113.21	6	13.3	6.8	контрольный
7	107.14	6	13.6	4.2	пропитанный
8	107.14	6	13.3	6.2	контрольный
9	111.11	6	14.6	4.5	пропитанный
10	193.55	20	15.4	11.1	контрольный
11	187.5	20	16.8	8.5	пропитанный
3	89.55	3	10	9.2	без преграды

3.1. Результаты виртуальных ударных испытаний для аттестации математической модели НКЖ

Проведенные ударные тесты на пробиваемость с пропитанными НКЖ и сухими элементами индивидуальной защиты показали большую эффективность первых. Для аттестации математической модели кевлар + НКЖ был построен виртуальный стенд, имитирующий ударный тест на пробиваемость пропитанного НКЖ и сухого элемента многослойной защитной оболочки (рис. 8).

Защитная оболочка представляет собой 4 слоя кевлара толщиной 0.2 мм погруженными в НКЖ. Для моделирования НКЖ применяется эйлерово представление.

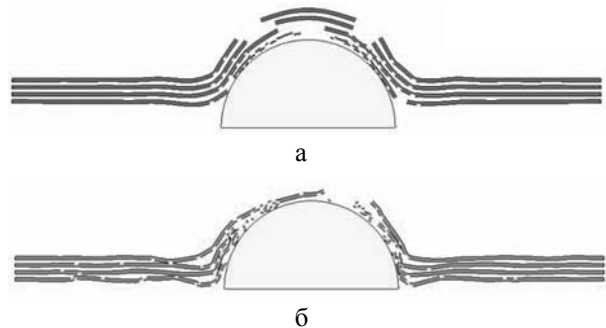


Рис. 8. Характер разрушения защитной оболочки: а – с пропиткой из НКЖ; б – без пропитки.

3.2. Оценка энергоемкости пропитанного НКЖ и сухого элемента защиты

Для оценки энергоемкости элементов защиты были проведены виртуальные ударные тесты с пропитанной НКЖ многослойной защитной оболочкой. Варьировался коэффициент трения между слоями и НКЖ от 0 до 1. Энергоемкость оценивалась по степени уменьшения кинетической энергии ударника. Наилучший результат получен при коэффициенте трения, равном 0.1. Худший – у непропитанного элемента (рис. 9). Разница в энергии составляет более 15%, что соответствует результатам натурных испытаний.

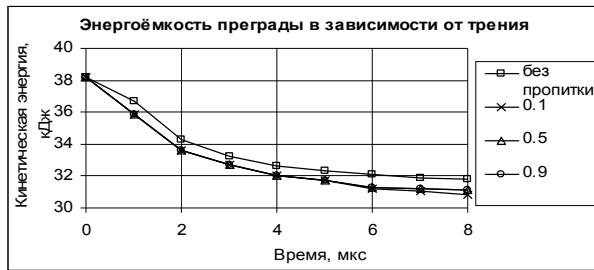


Рис. 9. Оценка энергоёмкости преграды

Заключение

В исследовании дано обоснование возможности представления НКЖ в характерном диапазоне изменений скоростей деформаций моделью ньютоновской жидкости и определены параметры этой модели, выявлена существенная роль контактных условий между НКЖ и кевларовой основой в механизме увеличения энергоёмкости преграды из композиции кевлар + НКЖ. Для эффективного моделирования защитных

многослойных преград из композиций кевлар + НКЖ необходимо установить корреляцию между размером наночастицы и коэффициентом трения между кевларом и НКЖ, что является целью ближайших исследований.

Основным практическим выводом из настоящего исследования является возможность улучшения защитных свойств многослойной преграды с использованием НКЖ пропитки.

Литература

1. Egres Jr. R.G. *Stab resistance of shear thickening fluid (STF)-kevlar composites for body armor applications* / R.G. Egres Jr., M.J. Decker, C.J. Halbach, Y.S. Lee, J.E. Kirkwood, K.M. Kirkwood, N.J. Wagner // *Proceedings of the 24th Army Science Conference, Nov. 29 – Dec. 2, 2004. – Orlando, FL., 2004.*
2. Lee Y.S. *Dynamic properties of shear thickening colloidal suspensions* / Y.S. Lee, Wagner N.J. // *Rheol. Acta. – Vol. 42. – P. 199-208.*

Поступила в редакцию 21.04.2009

Рецензент: д-р физ.-мат. наук, проф. Р.А. Васин, НИИ Механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия.

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПРОБИТТЯ БАГАТОШАРОВОЇ ПЕРЕПОНИ З ТКАНИНИ КОМПЗИТУ ІЗ НАНОКОМПЗИТНОГО ПРОСЯКАННЯ

П.О. Моссаковский, М.Є. Колотніков, Ф.К. Антонов

У статті представлені результати експериментально-обчислювального дослідження властивостей нанокompозитної рідини (НКР) і виконаний порівняльний аналіз пробиття багатошарової перепони з тканини кевларового композиту з НКР-просяканням і без нього. В якості НКР використовувався поліетиленгліколь, з впровадженнями в нього наночастками діоксиду кремнію. За результатами дослідження запропонована математична модель НКР. Уточнено контактні умови та параметри тертя між НКР і тканиною основою. Обґрунтовано твердження про можливість представлення НКР в характерному для ударних взаємодій діапазоні змін швидкостей деформації моделью ньютонівської рідини і визначені параметри зрушеної в'язкості та об'ємного стиснення для цієї моделі. За результатами натурних та віртуальних експериментів зроблений висновок про істотну роль контактних умов між НКР і кевларовою основою у механізмі збільшення енергоємності перепони з композиції кевлар + НКР.

Ключові слова: удар, пробиття тканин композит, нанокompозитна рідина, моделювання.

INVESTIGATION OF PUNCHING A MULTILAYER WOVEN COMPOSITE BARRIER TREATED WITH NANOCOMPOSITE FLUID

P.A. Mossakovsky, M.E. Kolotnikov, F.K. Antonov

The results of experimental and computational study of nanocomposite fluid (NCF) properties are observed. Comparative analysis of impact against neat and NCF treated laminated woven Kevlar composite is performed. The NCF used is composed of silica particles suspended in polyethylene glycol. The mathematical model of NCF is introduced as a result of the investigation. Contact conditions and friction parameters between NCF and tissue basis are refined. The statement about the possibility to represent NCF as Newtonian fluid in the typical impact strain rate range is substantiated and the parameters of shear viscosity and bulk compressibility of the model are defined. As a result of working and virtual tests it is concluded that the role of the contact conditions between NCF and Kevlar basis in the process of increasing the duty of Kevlar-NCF barrier is significant.

Key words: impact, punching, woven composite, nanocomposite fluid, modeling.

Моссаковский Павел Александрович – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотр., руководитель ЦКТМ НИИ механики МГУ, Москва, Россия, e-mail: moss@imech.msu.ru.

Колотников Михаил Ефимович – д-р техн. наук, проф., зам. генерального конструктора ФГУП «ММПП «САЛЮТ», Москва, Россия. e-mail: kolotnikov@salut.ru.

Антонов Федор Константинович – инженер-конструктор ФГУП «ММПП «САЛЮТ», Москва, Россия. e-mail: antonof@gmail.com.