

УДК 539.3

## О ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ СВОЙСТВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПРЕГРАД ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ СВЯЗУЮЩИХ НОВОГО ТИПА

**Ф.К. Антонов**

*Московский госуниверситет им. М.В. Ломоносова*

Подтверждена гипотеза о возможности представления нанокompозитной жидкости (НКЖ) в характерном диапазоне изменений скоростей деформаций моделью ньютоновской жидкости. Определены параметры этой модели, обосновано утверждение о ведущей роли контактных условий между НКЖ и кевларовой основой в механизме увеличения энергоемкости преграды из композиции кевлар + НКЖ.

Проведенные виртуальные ударные тесты на пробиваемость с пропитанными НКЖ и сухими элементами индивидуальной защиты показали большую эффективность первых. При этом улучшение энергопоглощающих способностей пропитанного элемента защиты обусловлено именно взаимодействием между волокнами композита и НКЖ.

Для элементов защиты с титановой основой показано, что наличие НКЖ-пропитки в кевларовом пакете позволяет не только увеличить энергоемкость преграды, но и значительно уменьшить прогиб основы.

*Ключевые слова:* удар, нанокompозитная жидкость, кевлар, эксперимент, расчет.

### **Введение**

По данным многочисленных экспериментальных исследований [1, 2], защитные свойства преграды, представляющей собой многослойный пакет из 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 размером 200–500 нм, равномерно внедренных в полимер – полиэтиленгликоль в 50–60% объемной концентрации.

В статье подтверждены результаты экспериментально-вычислительных исследований динамического поведения НКЖ и композиций органопластик + НКЖ, проведенных с целью уточнения математической модели взаимодействия ударника с преградой [3]. С применением полученной модели выполнен сравнительный анализ энергоемкости различных вариантов конструкций защитных оболочек.

Исследование включало четыре этапа:

1. Экспериментальное исследование динамических свойств НКЖ с использованием методики разрезного стержня Гопкинсона.
2. Построение компьютерной модели экспериментального стенда и проведение

виртуальных экспериментов для уточнения параметров математической модели НКЖ.

3. Проведение натурных и виртуальных динамических тестов на пробиваемость для аттестации математической модели НКЖ и уточнения контактных условий в композиции (органопластик + НКЖ).

4. Проведение виртуальных динамических тестов на пробиваемость различных вариантов защитных оболочек корпусов.

### Экспериментальное исследование

Динамические натурные испытания проводились в НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. Эксперименты по методике разрезного стержня Гопкинсона включали в себя две серии испытаний. Первая серия (испытуемый материал в жесткой обойме [4]) – для определения объемной сжимаемости НКЖ, вторая (в мягкой обойме) – для определения сдвиговой вязкости. Условия эксперимента выбирались таким образом, чтобы реализовать практически интересующий диапазон изменения скоростей деформаций в НКЖ (от 200 до 2000 с<sup>-1</sup>).

Результаты испытаний в жесткой обойме при различных скоростях деформаций от 200 до 2500 с<sup>-1</sup> показали, что напряженно-деформированное состояние (НДС) в образцах соответствует состоянию всестороннего гидростатического сжатия. Экспериментальная диаграмма зависимости напряжений от объемных деформаций приведена на рис. 1.

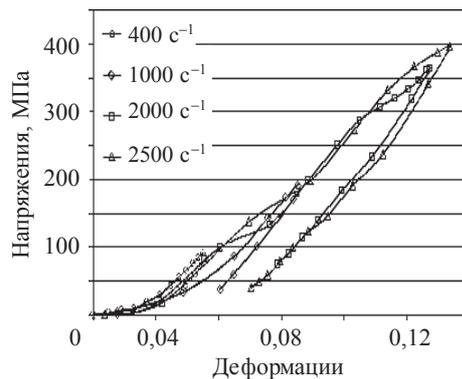


Рис. 1

Связь между напряжением и объемной деформацией не зависит от скорости деформации и хорошо аппроксимируется квадратичным соотношением:

$$-p = K_1\theta + K_2\theta^2,$$

где  $p$  – гидростатическое давление,  $\theta$  – объемная деформация,  $K_1 = 767$  МПа,  $K_2 = 3 \cdot 10^4$  МПа.

Для исследования сдвиговой вязкости НКЖ проводились эксперименты в мягкой обойме со скоростями деформаций 200, 500, 1000 и 2000 с<sup>-1</sup>. На рис. 2 изображены осредненные экспериментальные диаграммы напряжения (по показаниям тензомера на опорном стержне) от времени. После анализа результатов испытаний было сделано предположение, что характерный пик на графике – следствие высокой начальной неоднородности НДС в образце. Для подтверждения этой гипотезы были проведены виртуальные эксперименты по той же программе.

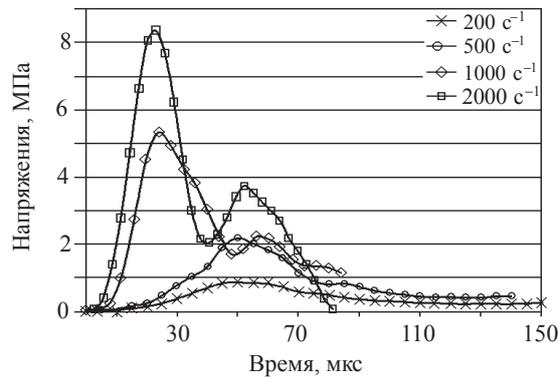


Рис. 2

### Виртуальные эксперименты

Виртуальные эксперименты проводились с использованием нелинейного кода LS-DYNA. Для моделирования сдвиговых свойств НКЖ использовалась модель ньютоновой жидкости, связывающая девиаторы напряжений  $\sigma_{ij}$  и скоростей деформаций  $\dot{\epsilon}_{ij}$ , в виде:

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

$\mu$  — сдвиговая вязкость.

Объемная сжимаемость задавалась с использованием квадратичной аппроксимации экспериментальных диаграмм испытаний в жесткой обойме по формуле

$$p = K_1\theta + K_2\theta^2.$$

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

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 натуральных и виртуальных испытаний дополнительно варьировался коэффициент трения между образцом и стержнями (от 0 до 1).

При проведении виртуальных испытаний использовался лагранжев подход для представления НКЖ.

Результаты виртуальных испытаний при различных скоростях деформаций при коэффициенте трения, равном 0,1, приведены на рис. 3: а) для скорости деформаций 500 с<sup>-1</sup>; б) для скорости деформаций 1000 с<sup>-1</sup>.

Сравнение экспериментальной и расчетной зависимостей показало хорошее качественное соответствие результатов виртуальных и натуральных испытаний. Наличие характерного пика напряжений в виртуальном эксперименте подтверждает высказанное предположение о наличии высокой начальной неоднородности НДС в образце и, как следствие, возникновение пика на графиках экспериментальной зависимости. Небольшой разброс по времени, наблюдаемый на графиках, вызван, по-видимому, возможными микропустотами в коробке с жидкостью, наличием

зазоров между торцами мерных стержней и наружными стенками коробки, а также погрешностями синхронизации импульсов при обработке экспериментальных данных.

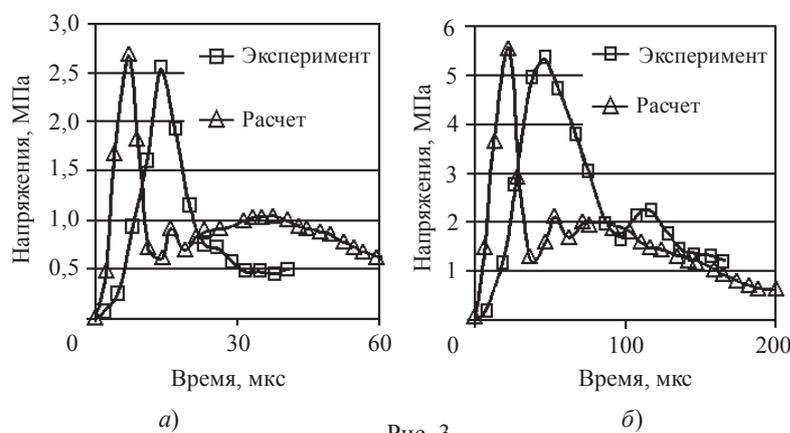


Рис. 3

Для сравнительной оценки энергоемкости преград из органопластика и композиции органопластик + НКЖ, а также для уточнения контактных условий между НКЖ и основой были проведены натурные и виртуальные тесты на пробиваемость с пропитанной НКЖ и сухой органопластиковой преградой. Испытания проводились на образцах (преградах), прикрепленных к мастичному блоку при обстреле их металлическими ударниками. В связи с тем, что расчет трехмерной задачи требует значительных вычислительных мощностей, в рамках данной работы моделирование ударных тестов проводилось в двумерной постановке.

Для аттестации математической модели НКЖ был построен виртуальный стенд, имитирующий ударный тест на пробиваемость пропитанного НКЖ и сухого элемента многослойной защитной оболочки.

Виртуальные эксперименты проводились при помощи метода конечных элементов с применением нелинейного кода LS-DYNA. Органопластиковые полотна моделировались упругим слоем, находящимся в состоянии плоской деформации. Модуль упругости полотна принимался равным модулю упругости нити,  $E = 124$  ГПа. Разрушение полотна инициировалось путем удаления элементов с удлинением, превышающим 2,4%. Для моделирования НКЖ применялась модель ньютоновой жидкости с параметрами, определенными по результатам испытаний по методу Кольского. Использовалось эйлерово представление конечно-элементной сетки. Процесс взаимодействия между НКЖ, волокнами, ударником и окружающей средой моделировался в обобщенной постановке Лагранжа–Эйлера [5]. Дополнительно между полотнами и жидкостью задавалось сухое трение, моделирующее трение между твердыми частицами НКЖ и волокнами.

Защитная оболочка состоит из 4 слоев органопластика толщиной 0,2 мм, погруженных в НКЖ. Для оценки энергоемкости элементов защиты были проведены виртуальные ударные тесты с пропитанной НКЖ и сухой многослойной защитной оболочкой. При этом взаимодействие между НКЖ и ударником моделировалось в обоих случаях, что позволяет исключить из сравнения потери энергии, связанные с инерционными явлениями. 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. На рис. 4 представлены графики зависимости энергии ударника от времени при различных значениях коэффициента трения между НКЖ и полотнами. Разница в энергии составляет около 15%, что соответствует результатам натуральных испытаний.

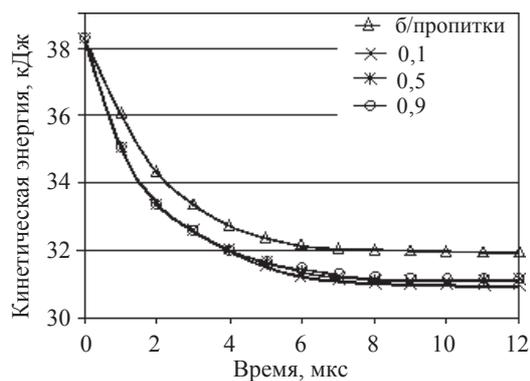


Рис. 4

Кроме того, проведены виртуальные тесты на пробивание трех вариантов защитных оболочек:

- 1) ударный тест на пробивание титановой оболочки толщиной 2,2 мм;
- 2) тест на пробивание элемента защиты, состоящего из титанового слоя толщиной 1,4 мм с 12 слоями кевлара толщиной 0,2 мм, без пропитки НКЖ;
- 3) тест на пробивание титанового слоя с 12 слоями кевлара с НКЖ-пропиткой.

Как известно, «схлопывание» слоев оболочки способствует ухудшению ее защитных характеристик. Наличие НКЖ-пропитки между слоями препятствует возникновению данного эффекта. Пропитка влияет также на величину прогиба титановой основы. Так, прогиб основы непропитанного элемента защиты составляет 13 мм, пропитанного – всего 3 мм.

На рис. 5 изображены графики зависимости кинетической энергии ударника от времени для всех трех видов защиты.

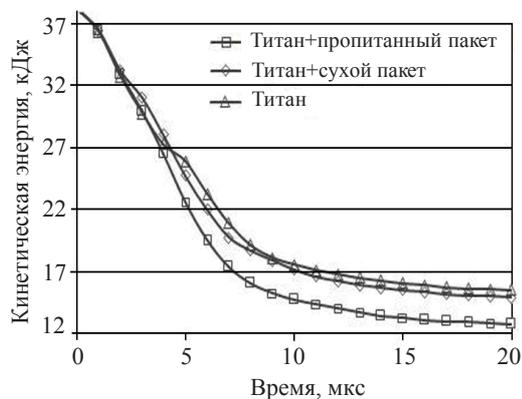


Рис. 5

Незначительная разница в значениях поглощенной энергии между чисто титановым элементом защиты и элементом защиты без пропитки обусловлена тем, что рассматриваемая задача исследуется в постановке, не учитывающей трение между волокнами внутри слоя.

### **Заключение**

Проведенные виртуальные ударные тесты на пробиваемость с пропитанными НКЖ и сухими элементами индивидуальной защиты показали большую эффективность первых. При этом улучшение энергопоглощающих способностей пропитанного элемента защиты обусловлено именно взаимодействием между волокнами композита и НКЖ.

Для элементов защиты с титановой основой показано, что наличие НКЖ-пропитки в органопластиковом пакете позволяет не только увеличить энергоемкость преграды, но и значительно уменьшить прогиб основы.

### *Литература*

1. Lee, Y.S. The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid / Y.S. Lee, E.D. Wetzel, N.J. Wagner // J. Mat. Sci. – 2003. – V. 38(13). – P. 2825–2833.
2. Lee, Y.S. Dynamic properties of shear thickening colloidal / Y.S. Lee // Rheol. Acta. – 2003. – V. 42. – P. 199–208.
3. Моссаковский, П.А. Исследование процесса пробивания многослойной преграды из тканого композита с нанокompозитной пропиткой / П.А. Моссаковский, М.Е. Колотников, Ф.К. Антонов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – №10/67. – С. 151–155.
4. Брагов, А.М. Модификация метода Кольского для исследования свойств малоплотных материалов при высокоскоростном циклическом деформировании / А.М. Брагов, А.К. Ломунов, И.В. Сергеичев // Прикладная механика и техническая физика. – 2001. – Т.42, №6. – С. 199–204.
5. Hallquist, J.O. LS-DYNA theory manual / J.O. Hallquist. – Livermore Software Technology Corporation. – 2006. – P. 17.1–17.27.

[06.10.2010]

## **ON THE POSSIBILITY OF IMPROVING THE PROTECTIVE PROPERTIES OF MULTYLAYERED OBSTACLES USING A NEW TYPE OF BINDER**

**F.K. Antonov**

The present work corroborates the hypothesis about the possibility of representing the behavior of shear thickening fluid (STF) in the characteristic range of strain rates using Newtonian fluid model. The parameters of such a model are determined; the leading role of the contact conditions between STF and a Kevlar base in the process of increasing the energy-absorption capacity of Kevlar-STF composite obstacles is substantiated.

The penetration tests conducted with STF-impregnated and dry elements of individual protection showed higher efficiency of the former. The increased energy-absorption capacity of STF-impregnated protection elements is due to the interaction between the composite fibers and STF. It is shown that the STF-impregnation of protective shells with titanium framework not only increases the absorption capacity of the obstacle but also significantly reduces the deflection of the base.

*Key words:* impact, STF, kevlar, experiment, computation.