

03;06.4;06.1

Динамическая сжимаемость нанокompозитной жидкости на основе полиэтиленгликоля

© А.М. Брагов, Л.А. Игумнов, А.Ю. Константинов, А.К. Ломунов,
Ф.К. Антонов, П.А. Моссаковский

Научно-исследовательский институт механики Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского
E-mail: bragov@mech.unn.ru

Поступило в Редакцию 30 апреля 2014 г.

Проведено экспериментальное исследование поведения нанокompозитной жидкости в условиях динамического нагружения. Испытания проводились с использованием метода Кольского и его модификаций. Определены зависимости давления в нанокompозитной жидкости от величины объемной деформации. Показано, что радиальные и осевые компоненты тензора напряжений практически совпадают, что свидетельствует о том, что материал ведет себя как несжимаемая жидкость. Характер кривых деформирования указывает на то, что в исследованном материале происходит некоторая диссипация энергии в цикле нагрузка–разгрузка.

Для повышения пулестойкости тканевых бронепакетов на основе известных материалов (кевлар, русар и др.) предпринимались попытки увеличения их энергопоглощающей способности за счет пропитки нанокompозитной жидкостью (НКЖ) [1–4]. В частности, для этих целей использовалась высококонцентрированная суспензия (коллоидная система, состоящая из жидкости и мелкодисперсной твердой фазы), в которой в качестве мелкодисперсной фазы выступают наночастицы диоксида кремния [1]. Приведенные в этих работах данные свидетельствуют о повышении защитных свойств пропитанных пакетов по сравнению с непропитанными. Это повышение авторы известных работ связывают с резким увеличением вязкости НКЖ при высоких скоростях деформации.

Следует отметить, что до настоящего времени имеется очень мало работ, в которых исследуется поведение нанокompозитной жидкости при скоростях деформации $10^2–10^4 \text{ s}^{-1}$. Этот диапазон как раз и реализу-

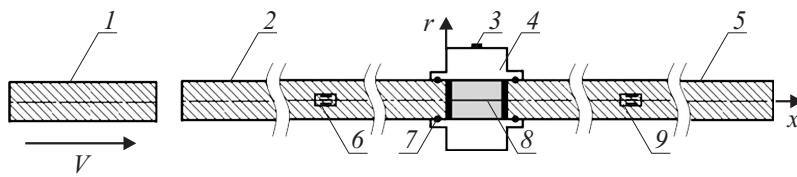


Рис. 1. Схема эксперимента.

ется при процессе проникания пули или осколков в бронепакет. В этой связи в работе проведено изучение динамической сжимаемости НКЖ на основе полиэтиленгликоля (ПЭГ), насыщенной частицами SiO_2 средним размером ~ 300 nm. Объемная доля SiO_2 в суспензии составила 52%, плотность суспензии 1.4 g/cm^3 .

Изучение динамической сжимаемости НКЖ проводилось с использованием модифицированного метода Кольского [5,6]. Схема установки приведена на рис. 1.

НКЖ 8 заливалась в контейнер-обойму 4, которая надевалась на концы мерных стержней 2, 5. Обойма герметизировалась от стержней с помощью резиновых колец 7, вставленных в канавки на обойме. Нагружение системы разрезного стержня Гопкинсона (РСГ) осуществлялось с помощью ударников 1 различной длины, разгоняемых в стволе газовой пушки. В процессе нагружения тензодатчиками 6 и 9 регистрировались падающий ε_I , отраженный от образца ε_R и прошедший ε_T импульсы деформации. В соответствии с методикой Кольского напряжения, деформации, скорость деформации однозначно определяются по импульсам деформации в стержнях из следующих соотношений:

$$\sigma_x(t) = E \frac{A}{A_s} \varepsilon_T(t),$$

$$\varepsilon_x(t) = -\frac{2C}{L_0} \int_0^t \varepsilon_R(t) dt,$$

$$\dot{\varepsilon}_x(t) = -\frac{2C}{L_0} \varepsilon_R(t),$$

где E — модуль Юнга материала мерных стержней, A и A_s — площади поперечных сечений мерных стержней и образца соответственно, C —

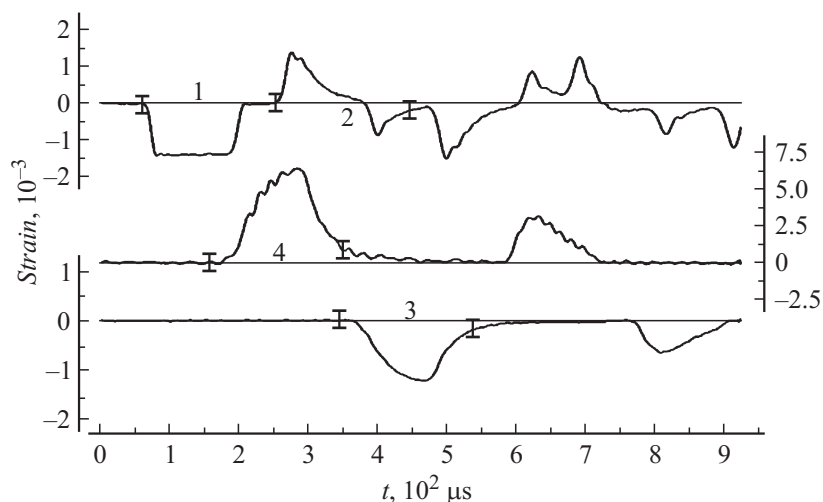


Рис. 2. Импульсы деформаций в мерных стержнях и на обойме: 1 — падающий, 2 — отраженный, 3 — прошедший, 4 — окружная деформация с обоймы.

скорость распространения упругих волн в стержнях, L_0 — длина рабочей части образца. Регистрация отраженного ε_R и прошедшего ε_T импульсов в мерных стержнях позволяла вычислить осевую диаграмму деформирования в условиях одноосной деформации.

Одновременно с этим тензодатчиком 3, размещенным на обойме, регистрировалась ее окружная деформация ε_θ . Показания тензодатчика на обойме давали возможность определить радиальную компоненту тензора напряжений и сравнить ее с осевой [5–7]:

$$\sigma_r(t) = \frac{1}{2R_2^2} [E(R_1^2 - R_2^2)\varepsilon_\theta(t)],$$

где E — модуль Юнга материала обоймы, R_1 и R_2 — соответственно наружный и внутренний радиусы обоймы.

На рис. 2 показаны импульсы деформаций в мерных стержнях и на обойме. В результате обработки исходных импульсов получены временные зависимости осевой и радиальной компонент напряжений, которые представлены на рис. 3. Из рисунка хорошо видно, что

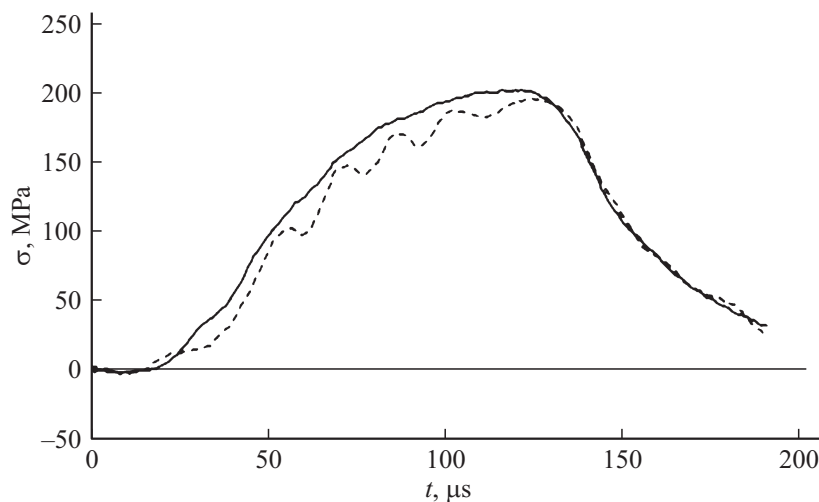


Рис. 3. Временные зависимости осевого (сплошная линия) и радиального (пунктирная линия) напряжений.

в пределах погрешности эксперимента ($\sim 5\text{--}7\%$) эти компоненты совпадают друг с другом. Последнее обстоятельство свидетельствует о том, что испытываемая НКЖ при скоростях деформации $\sim 10^3 \text{ s}^{-1}$ остается жидкостью. В связи с этим предположение, высказанное в работах [1–3], о том, что высококонцентрированные суспензии из наночастиц в условиях высокоскоростной деформации ведут себя как твердые тела, не соответствует действительности.

Диаграммы деформирования НКЖ, полученные в экспериментах при разных скоростях деформации, представлены на рис. 4. Здесь сплошными линиями показаны диаграммы $\sigma \sim \varepsilon$, а пунктирными — зависимости изменения скорости деформации (соответствующая ось справа). Цифровые маркеры на линиях служат для взаимной привязки диаграмм $\sigma \sim \varepsilon$ и $\dot{\varepsilon} \sim \varepsilon$.

Из рисунка видно, что изменение скорости деформации практически не влияет на участок диаграммы активного нагружения. Достигнутые величины напряжений и деформаций на диаграммах определяются амплитудой нагружающего импульса. Разгрузочные ветви диаграмм деформирования, так же как и нагружочные, нелинейны. Следует от-

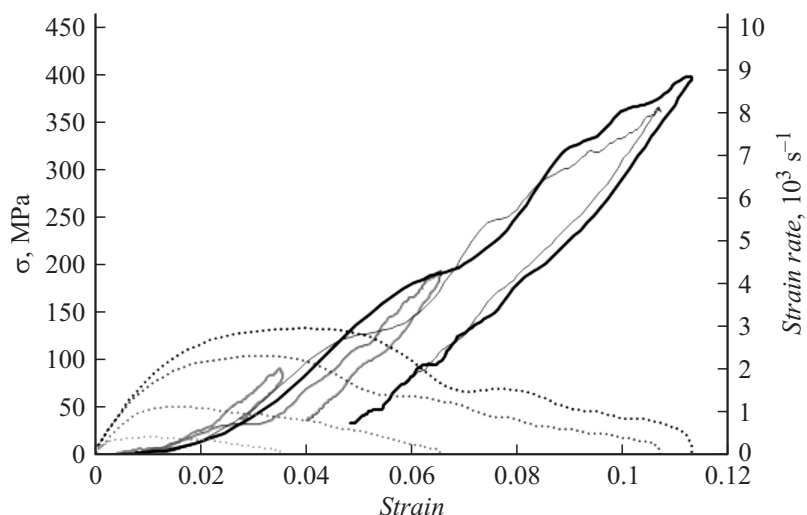


Рис. 4. Диаграммы, полученные при различных скоростях деформации (сплошная линия — напряжения, пунктир — скорость деформации).

метить, что нагружение и разгрузка происходят по разным кривым. К сожалению, из-за наложения импульсов практически невозможно проследить ход ветви разгрузки до нулевых напряжений, тем не менее хорошо видно, что имеет место явление гистерезиса, причем петля гистерезиса тем больше, чем выше напряжения, достигнутые в эксперименте. Наличие петель гистерезиса свидетельствует о некоторой диссипации энергии в цикле нагрузка–разгрузка. Это обстоятельство свидетельствует о том, что жидкость обладает вязкостью, которая может повышать пулестойкость пропитанных тканевых бронепакетов.

Таким образом, проведены динамические испытания и впервые получены диаграммы деформирования нанокompозитной жидкости. Показано, что в изученном диапазоне скорости деформации НКЖ ведет себя как сжимаемая жидкость, обладающая некоторыми вязкостными свойствами.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке РФФИ (гранты 13-01-97066, 13-08-0082, 14-08-00197)

Список литературы

- [1] Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования / Под ред. В.А. Григоряна. М.: РадиоСофт, 2008. 406 с.
- [2] Wagner N.J., Wetzel E.D. Protective fabrics utilizing shear thickening fluids (STFs) // The 4th conference on Safety and Protective Fabrics. USA, Pittsburg, 2004.
- [3] Lee Y.S., Wetzel E.D., Wagner N.J. // J. mat. Sci. 2003. V. 38. P. 2825–2833.
- [4] Lee Y.S., Wagner N.J. // Rheol. Acta. 2003. V. 42. P. 199–208.
- [5] Bragov A.M., Lomunov A.K., Grushevsky G.M. // Exper. Mechanics. 1996. T. 36. N 3. С. 237–242.
- [6] Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K. // DYMAT Journal. 1994. V. 1. N 3. P. 253–259.
- [7] Bragov A.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Tsembeles K., Proud W.G. // International J. Impact Engineering. 2008. V. 35. Iss. 9. P. 967–976.