

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ УПРУГО-ВЯЗКОЙ СЛОИСТОЙ ПРЕГРАДЫ С ПОМОЩЬЮ ДАТЧИКА АКТИВНОЙ СИЛЫ

Е.С. Долгих

dolgikh.e@sch2009.net

Е.Т. Капитанский

kapitanskij.e@sch2009.net

О.М. Лаврушин

lavrushin.o@sch2009.net

В.С. Норов

looking070@sch2009.net

Инженерно-физическая метрологическая лаборатория ГБОУ «Школа № 2009»,
Москва, Российская Федерация

Аннотация

Рассмотрен опыт применения нового типа датчика активной ударной силы, конструктивно сходного с магнитоупругим преобразователем, для исследования некоторых динамических характеристик вязкоупругой многослойной преграды, подверженной ударному воздействию. Выполнено сравнение двух различных вязкоупругих материалов по их способности уменьшать пиковое значение силы и энергию внешнего ударного воздействия, а также растягивать сам ударный импульс во времени. Работа позволяет экспериментально обосновать возможность построения методики для исследования динамических характеристик среды и параметров ударных процессов с помощью датчиков ударных контактных сил.

Ключевые слова

Ударная нагрузка, датчик активных ударных сил, композиционные материалы, упруго-вязкие среды, защитные преграды, энергоемкость преграды, эффективность защитных преград

Поступила в редакцию 02.06.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Рассмотрено применение нового датчика ударных активных сил [1] для исследования динамических свойств многослойных преград. В последнее время наблюдается повышенный интерес к подобным исследованиям. Это обусловлено тем, что с этой темой связана возможность создания инженерной методики для объективной оценки защитных композиций [2].

Основное свойство защитной преграды — ее способность переводить энергию внешнего воздействия в работу, которая затрачивается на преодоление различных защитных механизмов, используемых преградой. Эти механизмы имеют различную физическую природу: вязкое трение, пластическая деформация, тепловыделение, разрушение межмолекулярных связей, спонтанное излучение, фазовые переходы и т. д. Тем не менее все эти механизмы уменьшают долю энергии входного воздействия, которая могла бы перейти в поражающие факторы, связанные с остаточной кинетической энергией индентора или продуктов разрушения защитной преграды. Проблема в том, что существующий инструмен-

тарий не позволяет эффективно проводить экспериментальные исследования высокоинтенсивных, высокоскоростных процессов ударной деформации.

В Инженерно-физической метрологической лаборатории ГБОУ «Школа № 2009» был разработан прототип датчика ударных активных сил [3], конструктивно сходный с магнитоупругим преобразователем [4, 5]. Высокая механическая прочность датчика позволяет осуществлять регистрацию ударных контактных сил большой интенсивности (до нескольких гигапаскалей). Для этого датчика сил были разработаны и опробованы две методики динамической тарировки, подтвердившие работоспособность датчика.

Обоснование методики применения нового датчика ударных активных сил. Если для выполняемой задачи применима кинематическая схема, представленная на рис. 1, то с помощью датчика сил можно создавать инженерные методики исследования ударных процессов на основе анализа трансформации преградой «входного воздействия» [6].

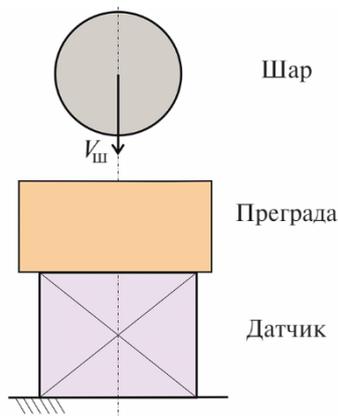


Рис. 1. Кинематическая схема эксперимента:

датчик, жестко закрепленный на массивной опоре; исследуемая преграда; падающий шар, создающий ударную нагрузку; $V_{ш}$ — вектор скорости падающего шара

Рассмотрим закон сохранения энергии для замкнутой системы «снаряд — преграда — датчик», $W = K + T + C$, где W — кинетическая энергия снаряда перед контактом с преградой, которая в процессе соударения с преградой перераспределяется в другие формы: в C — потенциальную энергию упругих деформаций системы, в K — кинетическую энергию совместного движения и скоростей упругих деформаций системы «снаряд — преграда — датчик», и в T — работу «диссипативных» сил, т. е. в рассматриваемом случае — работу по преодолению всех возможных защитных механизмов преграды [7].

В новом датчике активной ударной силы снимаемый сигнал пропорционален деформации его чувствительного элемента (ЧЭ) [1–3], диапазон возможных нагрузок выбран так, чтобы предельная деформация его ЧЭ не превышала его предела упругости.

Отметим, что предел упругости для вязкоупругих сплавов, к которым относится инвар, как показали работы [8–10], может увеличиваться в несколько раз, тем самым кратно увеличивая теоретический диапазон измеряемых нагрузок.

Сигнал, снимаемый с ЧЭ, связан с долями энергии вида $K + C$. Соответственно, используя простое преобразование: $T = W - (K + C)$, мы сможем оценить T — долю энергии снаряда, затраченную на работу по преодолению защитных свойств преграды.

Результаты экспериментальной работы. Нами были выполнены эксперименты, позволившие качественно оценить работоспособность измерительного комплекса и реализованной с помощью него методики по исследованию влияния свойств преграды на трансформацию ударной нагрузки. Ранее таких работ не проводилось.

Преграды представляли собой наборы пластин из двух различных вязкоупругих материалов: жесткий пластик толщиной 0,25 мм (материал 1) и полиуретановая пленка толщиной 0,7 мм (материал 2). Из этих пластин простым наложением собирали композиции толщиной от 1 до 10 слоев.

При сбросе падающей сборки с разной высоты h создавалась ударная нагрузка. С обмотки датчика снимали электрический сигнал $U(t)$. Типичная осциллограмма полученного при этом сигнала приведена на рис. 2.

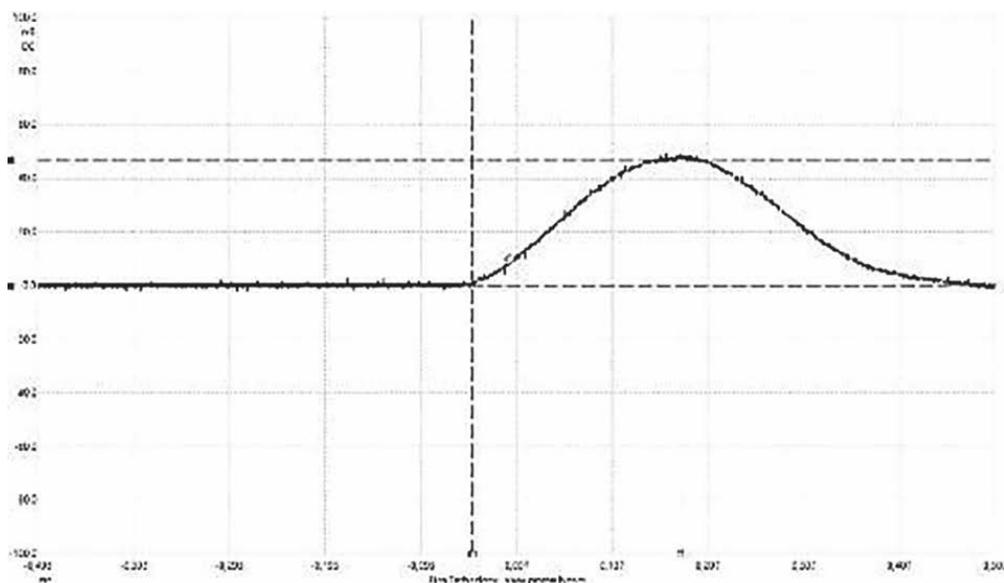


Рис. 2. Пример осциллограммы, полученной при ударе закаленного шара диаметром 25 мм, сброшенного с высоты 0,5 м (скриншот с экрана осциллографа)

Осциллограммы, полученные при падении сборки с высоты 10...70 см для преград с числом слоев 1, 2, 5, 10 материала 1, приведены на рис. 3.

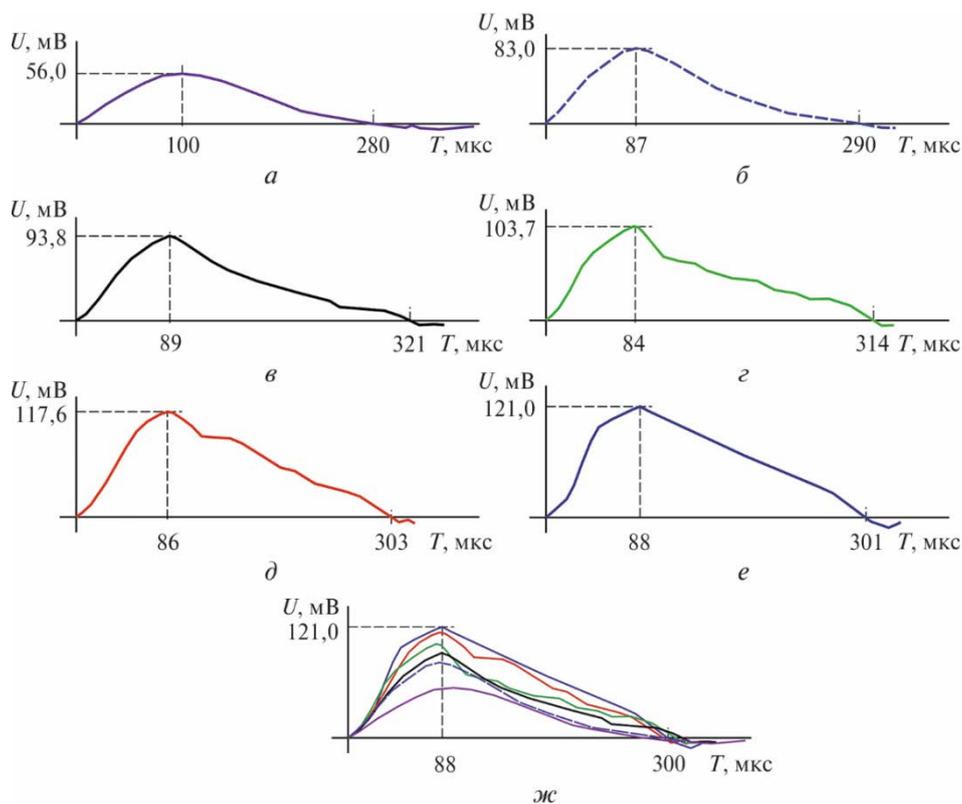


Рис. 3. Осциллограммы ударных процессов, полученных для одного слоя ($N = 1$) материала 1:

a — при сбросе шара с высоты $h = 0,1$ м; *б* — $0,2$ м; *в* — $0,3$ м; *г* — $0,4$ м; *д* — $0,6$ м; *е* — $0,7$ м; *ж* — сравнение всех осциллограмм, сведенных в поле одного графика

На рис. 4 представлены сведенные осциллограммы, полученные при сбросе шара с высоты $0,1 \dots 0,7$ м.

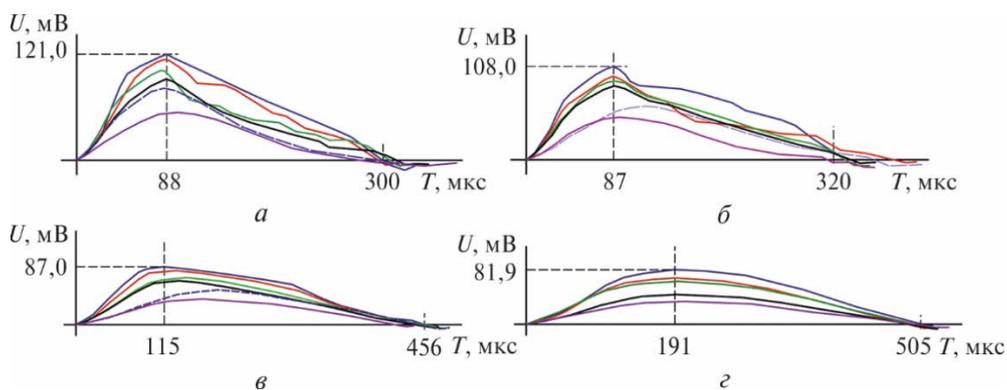


Рис. 4. Сведенные в одном графике осциллограммы ударных процессов, полученных для разного числа слоев материала 1 и разных высот сброса:

a — для $N = 1$; *б* — $N = 2$; *в* — $N = 5$; *г* — $N = 10$

На рис. 5 осциллограммы скомбинированы по приложенной к композиции одинаковой ударной нагрузке, определяемой высотой сброса, при этом композиции имели разное число слоев. Такая подборка осциллограмм наглядно показывает, что с увеличением толщины преграды уменьшается пиковое значение напряжения и одновременно растет длительность ударного импульса.

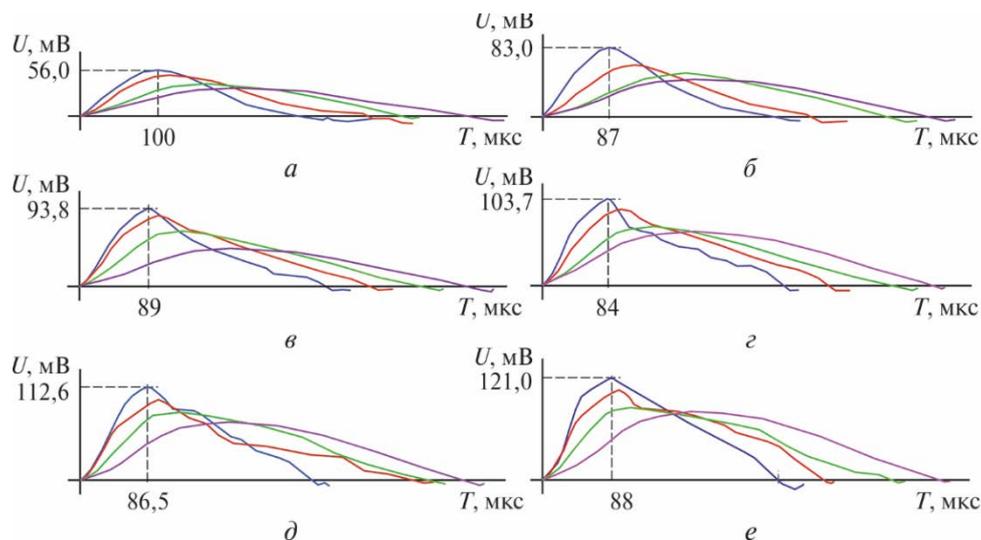


Рис. 5. Трансформации сигнала при увеличении толщины преграды из материала 1, полученные при нагрузке:

a — сброс шара с высоты $h = 0,1$ м; *б* — $h = 0,2$ м; *в* — $h = 0,3$ м; *г* — $h = 0,4$ м; *д* — $h = 0,5$ м; *е* — $h = 0,7$ м; на графиках синим цветом показаны осциллограммы, полученные для преграды толщиной в один слой ($N = 1$); красным — $N = 2$; зеленым — $N = 5$; фиолетовым — $N = 10$

На рис. 3–5 видно, что значение нагрузки и толщина преграды существенно влияют на параметры процесса соударения, и это надежно регистрируется с помощью датчика сил. Отметим, что пиковое значение сигнала U_m определяется на осциллограмме точнее, чем его длительность или длительность переднего фронта $T_{п.ф.}$

Такие же работы были проведены с более мягким материалом 2 (полиуретановой пленкой). На рис. 6 для наглядности приведены осциллограммы, полученные при ударе шара, сброшенного с высоты $h = 0,3$ м, о преграду, составленную из пакета пленок толщиной в 0, 1, 2, 3, 5, 7, 10 слоев.

На рис. 5, 6 видно, что предлагаемая кинематическая схема эксперимента и новый датчик динамической силы позволяют хорошо различать и изменение входной нагрузки, и толщину и материал преграды. При этом информационными параметрами становятся и пиковое значение, и длительность регистрируемого сигнала.

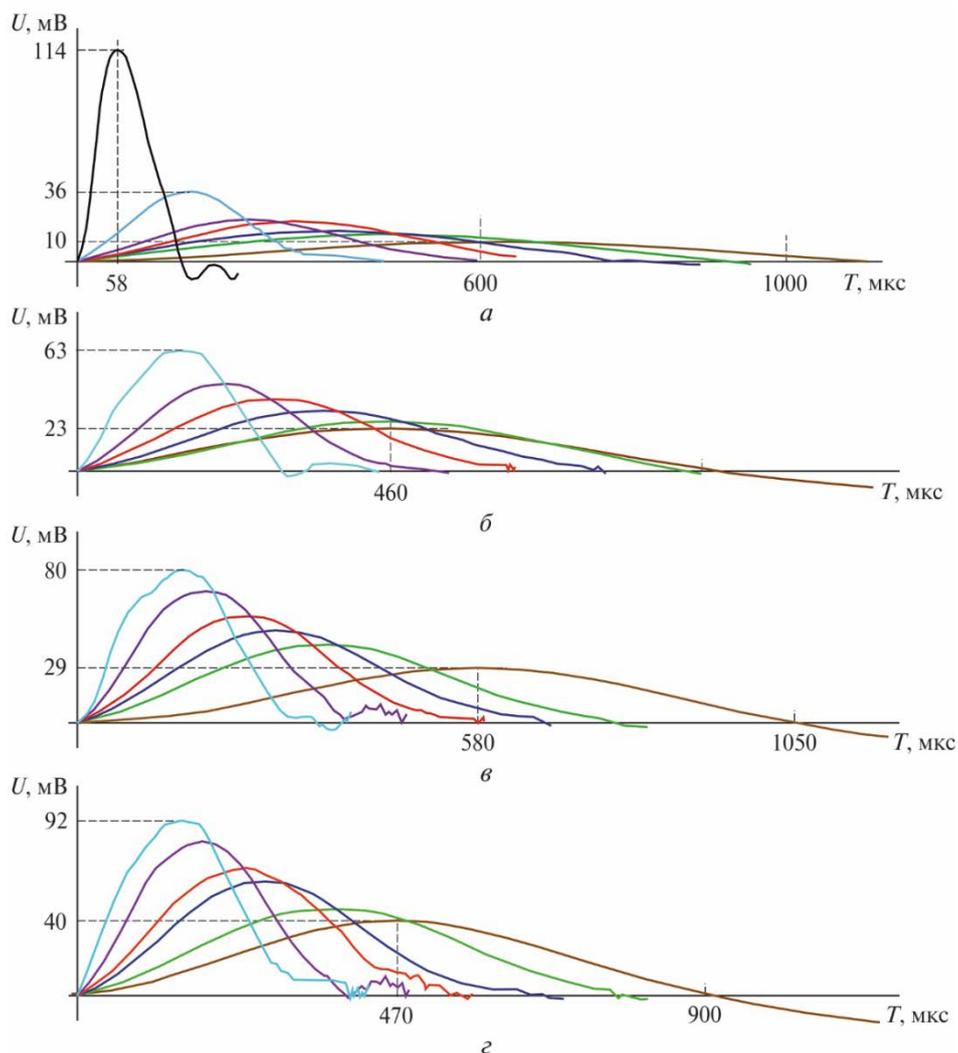


Рис. 6. Трансформации сигнала при увеличении толщины преграды из материала 2, полученные при нагрузке:

а — сброс шара с высоты $h = 0,1$ м; *б* — $h = 0,3$ м; *в* — $h = 0,5$ м; *г* — $h = 0,7$ м; на графиках черным цветом выполнена осциллограмма, полученная при отсутствии преграды ($N = 0$); бирюзовым — $N = 1$; фиолетовым — $N = 2$; красным — $N = 3$; синим — $N = 5$; зеленым — $N = 7$; коричневым — $N = 10$

Перейдем к графической обработке результатов экспериментов. На рис. 7 построим зависимости от толщины слоистой преграды S в миллиметрах: 1) пикового значения сигнала $U_m(S)$; 2) длительности переднего фронта $T_{п.ф}(S)$. Эти зависимости построим отдельно для четырех вариантов ударной нагрузки, создаваемой сбросом шара с высоты $h = 0,1; 0,3; 0,5; 0,7$ м. Дополнительно проведем нормировку соответствующих значений U_m и $T_{п.ф}$ по значениям этих параметров сигнала, полученным при отсутствии преграды: $U_m(S = 0)$ и $T_{п.ф}(S = 0)$.

Графические зависимости изменения $T_{п.ф}$ и U_m ударного импульса которая с точностью до постоянного коэффициента соответствует пиковому значению силы, представлены на рис. 7. При этом для значений U_m была проведена нормировка по пиковому значению силы соударения в варианте без преграды.

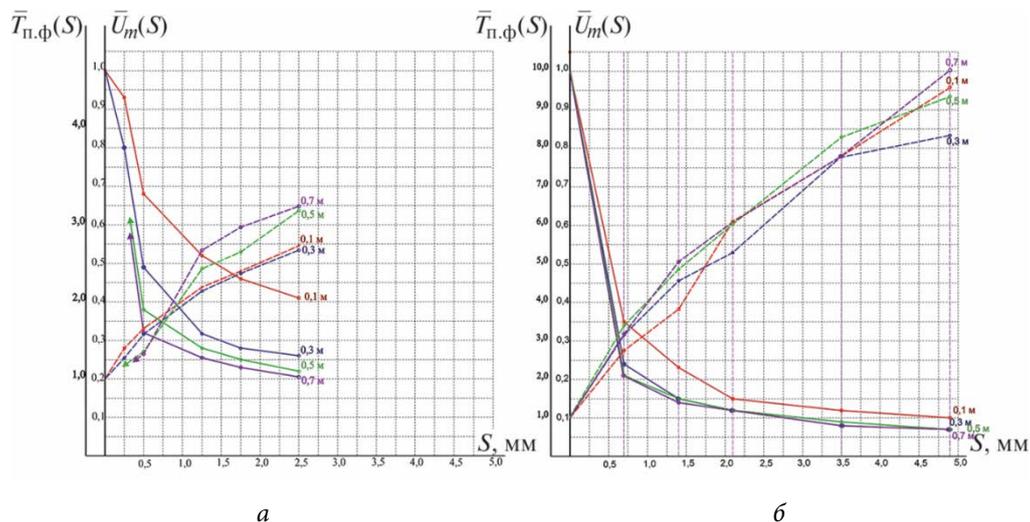


Рис. 7. Графики изменения приведенного пикового значения сигнала \bar{U}_m и приведенной длительности переднего фронта $\bar{T}_{п.ф}$ ударного воздействия на датчик силы в зависимости от толщины S используемой преграды:

а — для материала 1; *б* — для материала 2; сплошной линией показаны зависимости $\bar{U}_m(S)$, пунктирной — $\bar{T}_{п.ф}(S)$; красным цветом обозначены зависимости, полученные для ударных нагрузок при сбросе шара с высоты $h = 0,1$ м; синим — $h = 0,3$ м; зеленым — $h = 0,5$ м; фиолетовым — $h = 0,7$ м

Как видно на рис. 7, материалы 1 и 2 проявляют разную реакцию на ударную нагрузку. У нас не было возможности количественно оценить остаточные деформации материалов после снятия нагрузки, но на рис. 7 видно, что материал 1, несмотря на большую жесткость, в этом диапазоне скоростей проявляет большую зависимость от скорости деформации, в отличие от материала 2. И, как более жесткий, при сравнимых толщинах материал 1 в меньшей степени снижает пиковое значение и длительность ударного взаимодействия. Мало того, в рассмотренном диапазоне скоростей материал 2 (полиуретан) ведет себя как упругая среда, практически не проявляя ни вязких, ни пластических свойств. Поскольку, во-первых, на рис. 7, *б* пронормированные зависимости практически накладываются друг на друга, это означает, что вязкое трение и пластическое течение, зависящее от скорости деформации, минимальны. А во-вторых, на рис. 6 передний фронт сигнала практически равен заднему, это соответствует минимальному влиянию релаксационных процессов, что характерно для упругих деформаций.

Для более наглядного сравнения двух материалов сведем их графические зависимости на одном поле. Для простоты выберем зависимости $U_m(S)$ и $T_{п.ф.}(S)$ для двух материалов, полученные при сбросе шара с высоты $h = 0,3$ м (рис. 8).

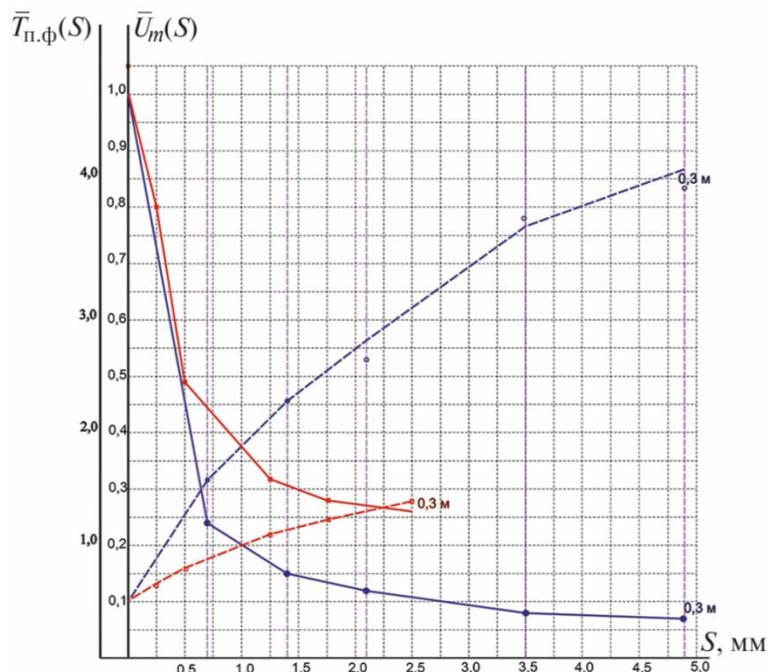


Рис. 8. Графики изменения приведенных пиковой величины сигнала \bar{U}_m и длительности переднего фронта $\bar{T}_{п.ф.}$ сигнала в зависимости от толщины S , используемой преграды, при сбросе шара с высоты $h = 0,3$ м:

сплошной линией показаны зависимости $\bar{U}_m(S)$, пунктирной — $\bar{T}_{п.ф.}(S)$; красным цветом обозначены зависимости, полученные для материала 1, синим — для материала 2

На рис. 7 хорошо видно отличие в поведении преграды, состоящей из упругих материалов с разной жесткостью, которое можно оценить по запрегоградному действию на датчик сил. Более мягкий полиуретан способствует более быстрому падению силы соударения и одновременно более быстрому росту длительности процесса соударения.

Еще одну важную сравнительную характеристику материалов можно получить, если перейти к зависимости $U_m^2(S)$. Поскольку значение U_m в рабочем диапазоне датчика соответствует деформации его ЧЭ и соответственно, упругой силе деформации, то величина U_m^2 с точностью до постоянного коэффициента будет соответствовать потенциальной энергии упруго сжатого ЧЭ в базовой точке, со-

ответствующей $T_{п.ф}$, моменту его наибольшей деформации. Таким образом, потенциальная энергия упругого сжатия будет наиболее близко соответствовать полной энергии соударения. В соответствии с кинематической схемой, представленной на рис. 1, чем больше будет доля потенциальной энергии, приходящейся на деформацию преграды, тем меньше будет доля потенциальной энергии, приходящейся на деформацию ЧЭ, т. е. эти величины находятся в прямой взаимосвязи. При упругом соударении с определенными допущениями можно считать, что сумма этих долей будет равна величине $E = U_m^2$, полученной в отсутствие преграды. Проведя соответствующие преобразования и с учетом нормировки, получим зависимости $\bar{E}_1(S) = U_m^2(S)/U_m^2(S=0)$, $\bar{E}_2(S) = 1 - [U_m^2(S)/U_m^2(S=0)]$ (рис. 9).

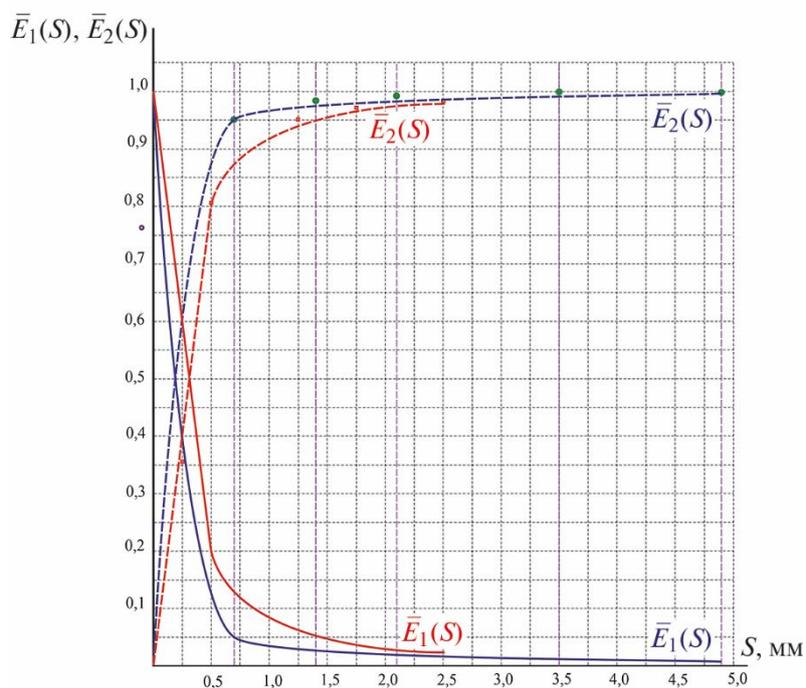


Рис. 9. Сравнительные графики относительного изменения в зависимости от толщины преграды приведенных полной энергии упругой деформации ЧЭ датчика $\bar{E}_1(S)$ (сплошной линией) и материала преграды $\bar{E}_2(S)$ (пунктирной линией); для материала 1 — красным цветом и материала 2 — синим цветом

Рис. 9 дает наглядное представление о том, какая доля энергии внешнего воздействия идет на преодоление сопротивления преграды, а какая формирует запреградное действие.

Еще одной интересной характеристикой при сравнительном анализе различных преград может быть величина, эквивалентная мощности (интенсивно-

сти) запреградного воздействия. Эта величина равна отношению энергии запреградного воздействия к длительности переднего фронта, которая определяет активный этап ударного взаимодействия. Такая характеристика может быть очень значимой для построения инженерных методик оптимизаций ударостойких защитных конструкций.

Заключение. По результатам проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. Новый датчик подтвердил свою работоспособность при использовании в простой, но перспективной кинематической схеме проведения экспериментов (см. рис. 1).

2. Датчик позволяет объективно сравнивать материалы с различными свойствами по их реакции на ударное воздействие и строить на этой основе оптимизационные ряды для каких-либо конструкторских параметров.

3. Полученные графические зависимости $U_m(S)$, $T_{п.ф}(S)$, $U_m^2(S)$ имеют вид, позволяющий подобрать соответствующие алгебраические функции, параметрическими коэффициентами которых будут служить динамические характеристики исследуемых сред.

Литература

- [1] Лаврушин М.Ю. Датчики измерений на основе генераторного эффекта в ферромагнетиках. *Приборы*, 2020, № 5 (239), с. 21–27.
- [2] Лаврушин М.Ю. Датчик для измерения ударных контактных сил. *Инженерно-физические проблемы новой техники. XIV ВНТК: сб. матер.* Москва, Диона, 2020, с. 51–55.
- [3] Лаврушин М.Ю. Исследование поведения ферромагнетика при динамической деформации на примере инвара 44НХТЮ. *Приборы*, 2022, № 10 (268), с. 54–62.
- [4] Бауманн Э. *Измерение сил электрическими методами.* Москва, Мир, 1978, 430 с.
- [5] Шишкинский В.И. *Магнитоанизотропные монолитные силоизмерители.* Москва, Машиностроение, 1981, 80 с.
- [6] Лаврушин М.Ю. Исследование процессов высокоскоростной деформации контактным датчиком силы. *Инженерно-физические проблемы новой техники. XIV ВНТК: сб. матер.* Москва, Диона, 2020, с. 56–58.
- [7] Харкевич А.А. *Теория преобразователей: избранные труды. В 3 т. Т. 1. Теория электроакустических преобразователей.* Москва, Наука, 1973, с. 52–217.
- [8] Ващенко А.П. Экспериментальные методы и механические свойства конструкционных материалов при высокоскоростной деформации ($10^2 \dots 10^5 \text{ с}^{-1}$) и температурах 77...773 К. *Проблемы прочности*, 2002, № 3, с. 55–61.
- [9] Зубов В.И., Степанов Г.В., Широков А.В. Влияние скорости деформации на предел текучести сталей различной прочности. *Проблемы прочности*, 2003, № 5, с. 113–122.
- [10] Баландин Вл.Вас., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Игумнов Л.А., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. *Высокоскоростное деформирование и разрушение стали 09Г2С. Механика твердого тела*, 2014, № 6, с. 78–85.

Дроздов Александр Павлович — ученик 9-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Капитанский Егор Тимофеевич — ученик 10-го А класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Лаврушин Олег Михайлович — ученик 9-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Норов Виталий Сергеевич — ученик 9-го В класса ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Лаврушин Михаил Юрьевич научный руководитель Инженерно-физической метрологической лаборатории ГБОУ «Школа № 2009», Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Дроздов А.П., Капитанский Е.Т., Лаврушин О.М., Норов В.С. Методика исследования упруго-вязкой слоистой преграды с помощью датчика активной силы. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 11 (88). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-11-948>

METHOD FOR STUDYING THE VISCOELASTIC LAYERED OBSTACLES USING THE ACTIVE FORCE SENSOR

E.S. Dolgikh

dolgikh.e@sch2009.net

E.T. Kapitanskiy

kapitanskij.e@sch2009.net

O.M. Lavrushin

lavrushin.o@sch2009.net

V.S. Norov

looking070@sch2009.net

Engineering Physics Metrology Laboratory, SBEI School No. 2009, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers experience in using a new type of the active impact force sensor being structurally similar to a magneto-elastic transducer to study certain dynamic characteristics of the viscoelastic multilayer barrier exposed to an impact. Two different viscoelastic materials were compared in terms of their ability to reduce the external impact peak force and energy, as well as to stretch the impact pulse over time. The work makes it possible to experimentally substantiate a possibility of constructing methodology for studying the media dynamic characteristics and the impact process parameters using the impact contact force sensors.

Keywords

Impact load, active impact force sensor, composite materials, viscoelastic media, protection barriers, barrier energy intensity, protection barrier effectiveness

Received 02.06.2023

© Bauman Moscow State Technical University, 2023

References

- [1] Lavrushin M.Yu. Measurement sensors based on the generator effect in ferromagnets. *Pribory*, 2020, no. 5 (239), pp. 21–27. (In Russ.).
- [2] Lavrushin M.Yu. Sensor for measuring impact contact forces. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki. XIV VNTK: sb. mater.* [Engineering-physical problems of new technology. XIV VNTK: collection of materials]. Moscow, Diona Publ., 2020, pp. 51–55. (In Russ.).
- [3] Lavrushin M.Yu. Investigation of the behavior of a ferromagnet under dynamic deformation using the 44NKhTYu invar as an example. *Pribory*, 2022, no. 10 (268), pp. 54–62. (In Russ.).
- [4] Baumann E. *Izmerenie sil elektricheskimi metodami* [Measurement of forces by electrical methods]. Moscow, Mir Publ., 1978, 430 p. (In Russ.).
- [5] Shishkinskiy V.I. *Magnitoanizotropnye monolitnye siloizmeriteli* [Magnetoanisotropic monolithic force meters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1981, 80 p. (In Russ.).
- [6] Lavrushin M.Yu. Research of processes of high-speed deformation by the contact gauge of force. *Inzhenerno-fizicheskie problemy novoy tekhniki. XIV VNTK: sb. mater.* [Engineering-physical problems of new technology. XIV VNTK: collection of materials]. Moscow, Diona Publ., 2020, pp. 56–58. (In Russ.).
- [7] Kharkevich A.A. *Teoriya preobrazovateley: izbrannye trudy. V 3 t. T. 1. Teoriya elektroakusticheskikh preobrazovateley* [Theory of transducers: selected works. Vol. 1. Theory of electroacoustic transducers]. Moscow, Nauka Publ., 1973, pp. 52–217. (In Russ.).

- [8] Vashchenko A.P. Experimental methods and mechanical properties of structural materials at high-speed deformation ($10^2 \dots 10^5 \text{ s}^{-1}$) and temperatures 77...773 K. *Problemy prochnosti*, 2002, no. 3, pp. 55–61. (In Russ.).
- [9] Zubov V.I., Stepanov G.V., Shirokov A.V. The influence of strain rate on the yield strength of steels of different strengths. *Problemy prochnosti*, 2003, no. 5, pp. 113–122. (In Russ.).
- [10] Balandin V.V., Balandin V.V., Bragov A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Y., Lomunov A.K. High-rate deformation and fracture of steel 09G2S. *Mechanics of Solids*, 2014, vol. 49, no. 6, pp. 666–672.

Drozdov A.P. — Student, 9th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Kapitanskiy E.T. — Student, 10th grade A, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Lavrushin O.M. — Student, 9th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Norov V.S. — Student, 9th grade B, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Lavrushin M.Yu., Scientific Director, Engineering and Physical Metrology Laboratory, State Budgetary Educational Institution “School no. 2009”, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Drozdov A.P., Kapitanskiy E.T., Lavrushin O.M., Norov V.S. Method for studying the viscoelastic layered obstacles using the active force sensor. *Politekhnichestkiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 11 (88). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-11-948>