

УДК (УДК) 621.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕЙСТВИЯ УДАРНЫХ НАГРУЗОК НА ЗАПРЕГРАДНОЕ
УСИЛИЕ КОМБИНИРОВАННОЙ ПРЕГРАДЫSTUDIES OF THE EFFECT OF SHOCK LOADS ON THE BARRIER FORCE OF
A COMBINED BARRIERДвойников Д.А., Залазинский А.Г., Нестеренко А.В., Швейкин В.П.
Dvoynikov D.A., Zalazinsky A.G., Nesterenko A.V., Shveikin V.P.Институт машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук
(Екатеринбург, Россия)

Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russian Federation)

Аннотация. Развитие материаловедения связано с разработкой и исследованиями композиционных материалов волокнистого и слоистого строения, которые находят широкое применение в современном машиностроении. Среди широкого спектра вопросов, связанных с исследованиями слоистых композитов, можно выделить прикладные задачи в области динамического взаимодействия объектов. Анализ методов повышения сопротивления пробиванию преграды приводит к заключению необходимости выполнения ряда конкурирующих друг с другом требований: масса, толщина преграды и остаточная энергия динамически взаимодействующих объектов в случае разрушения преграды должны быть минимальными, ее живучесть максимальной. Целью исследования является изучение действия силовых нагрузок на запреградное усилие в конструктивных элементах изделий, снабжённых комбинированными преградами. Для этого предложена модель комбинированной преграды, содержащая отражающий слой, прослойку из пористого лёгкого металла для поглощения энергии и слой, задерживающий продукты удара. Реализовано численное моделирование динамического нагружения преграды и дана аналитическая оценка прогнозирования ее разрушения по типу «выбивания пробки» при силовом нагружении высокоскоростным жёстким ударником, также выполнен эксперимент по квазистатическому внедрению индентора в преграду с пористым слоем. Совместное применение имитационного и физического моделирования конструктивных элементов позволяет прогнозировать живучесть и надёжность конструкций на стадии проектирования изделий машиностроения, при этом существенно сокращаются трудозатраты и стоимость необходимых для выполнения требуемых работ.

Ключевые слова: комбинированная преграда, силовое нагружение, высокоскоростной удар, запреградное усилие.

Abstract. The development of materials science is associated with the development and research of composite materials of fibrous and layered structures, which are widely used in modern mechanical engineering. Among the wide range of issues related to the research of layered composites, applied problems in the field of dynamic interaction of objects can be distinguished. The analysis of methods for increasing the barrier penetration resistance leads to the need to fulfill a number of competing requirements: the mass, thickness of the barrier and the residual energy of dynamically interacting objects in the event of destruction of the barrier should be minimal, its survivability maximum. The purpose of the study is to study the effect of force loads on the barrier force in the structural elements of products equipped with combined barriers. For this purpose, a model of a combined barrier is proposed, containing a reflective layer, a layer of porous light metal to absorb energy, and a layer that delays impact products. Numerical modeling of the dynamic loading of an obstacle has been implemented and an analytical assessment of the prediction of its destruction by the type of "knocking out a plug" under force loading by a high-speed rigid impactor has been performed, as well as an experiment on the quasi-static insertion of an indenter into an obstacle with a porous layer. The combined use of simulation and physical modeling of structural elements makes it possible to predict the survivability and reliability of structures at the design stage of mechanical engineering products, while significantly reducing labor costs and the cost of performing the required work.

Keywords: combined obstacle, force loading, high-speed impact, barrier force.

Дата получения статьи: 16.07.2026
Дата принятия к публикации: 24.08.2026
Дата публикации: 25.09.2026

Date of manuscript reception: 16.07.2026
Date of acceptance for publication: 24.08.2026
Date of publication: 25.09.2026



Сведения об авторах:

Двойников Дмитрий Алексеевич – кандидат технических наук, научный сотрудник лаборатории системного моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), *e-mail: dm.dvoynikov@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0748-2375>

Залазинский Александр Георгиевич – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории системного моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН),

e-mail: zalaz@list.ru.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-5475>

Нестеренко Антон Владимирович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории микромеханики материалов Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), *e-mail: nav@imach.uran.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7010-6260>

Швейкин Владимир Павлович – доктор технических наук, доцент, директор, заведующий лабораторией системного моделирования Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института машиноведения имени Э.С. Горкунова Уральского отделения Российской академии наук (ИМАШ УрО РАН), *e-mail: shveikin60@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9316-1369>

Authors' information:

Dmitriy A. Dvoynikov - Candidate of Technical Sciences, Researcher at the Laboratory of System Modeling of the Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), *e-mail: dm.dvoynikov@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0748-2375>

Alexandr G. Zalazinsky - Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher at the Laboratory of System Modeling of the Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), *e-mail: zalaz@list.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8352-5475>

Anton V. Nesterenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher at the Laboratory of Micromechanics of Materials of the Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), *e-mail: nav@imach.uran.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7010-6260>

Vladimir P. Shveikin – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director, Head at the Laboratory of System Modeling of the Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (IES UB RAS), *e-mail: shveikin60@mail.ru*.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9316-1369>

1. Введение

Развитие современного материаловедения связано с разработкой и исследованиями композиционных материалов волокнистого и слоистого строения, которые находят широкое применение в современном авиастроении, при создании нового оборудования атомной энергетики, транспортном машиностроении, проектировании сложных изделий, эксплуатируемых в экстремальных условиях в различных отраслях техники [1]. Среди широкого спектра вопросов, связанных с исследованиями слоистых композитов можно выделить прикладные задачи, перечисленные в [2], которые возникают в области исследований динамического взаимодействия объектов. Например, при разработке газотурбинных двигателей летательных аппаратов в соответствии с российскими и международными авиационными нормами должна быть

обеспечена прочность корпуса силовой установки при обрыве лопасти вращающегося ротора, попадании птиц или льда. Корпус бортового накопителя полетной информации и обшивка композитного крыла самолета должны выдерживать локальное ударное воздействие заданной кинетической энергии. Защитные контейнеры для транспортировки и хранения отработавшего ядерного топлива в соответствии с нормами МАГАТЭ должны сохранять прочность при локальном деформировании в условиях падения на вертикальный цилиндрический стержень. В передвижных средствах, перевозящих ценные грузы, также широко используются защитные композитные конструкции. В состав композитов слоистого строения включаются в том числе пористые прослойки для поглощения кинетической энергии при динамическом взаимодействии объектов и диссипации упругих колебаний, обеспечивающих замедление роста

усталостных трещин в элементах машин и оборудования.

Анализ состояния вопроса по методам повышения сопротивления пробиванию преграды приводит к необходимости выполнения ряда требований: масса, толщина преграды и остаточная энергия динамически взаимодействующих объектов в случае разрушения преграды должны быть минимальными, ее живучесть максимальной. Данные требования являются конкурирующими, в частности, неограниченное увеличение прочности приводит к хрупкому разрушению и снижению живучести. Во многих случаях материалом для пористых слоев многослойных (комбинированных) преград выбирают материалы на основе алюминия и его сплавов, к достоинствам которых, помимо прочего, можно отнести малый вес и коммерческую доступность. Повышение надёжности комбинированных защитных конструкций может быть достигнуто применением методов многокритериальной оптимизации.

Результаты экспериментальных исследований различных авторов показали эффективность использования пористых прослоек в комбинированных преградах. При этом в ряде работ исследована чувствительность пористого металла к скорости деформации. Она варьируется в зависимости от конкретного материала, геометрии и метода обработки. Например, в [3] сообщается о влиянии скорости деформации на свойства алюминиевой пены с относительной плотностью 0,1, когда образцы пеноматериала подвергаются сжатию при динамической и квазистатической деформации. В частности, прочность на сжатие почти удваивается при увеличении скорости деформации на шесть порядков. Кроме того, поглощение энергии на единицу объема материала ALPORAS при динамическом нагружении на 50% больше, чем при квазистатическом. Противоположные результаты получены в [4], где приводятся результаты исследования двух пеноалюминиевых материалов (Alulight and Duocel). Установлено, что динамическое поведение этих пен похоже на их квазистатическое поведение. В [5] для алюминиевой пены с открытыми ячейками не выявлено зависимости

прочности на сжатие от скорости нагрузки. В [6] авторы приводят экспериментальные данные изучения поведения пеноалюминия, усиленного полыми стальными сферами при различных скоростях сжатия. Так на универсальной сервогидравлической испытательной машине MTS проводились испытания на квазистатическое сжатие при скорости ползуна 1,27 мм/мин, а на высокоскоростное сжатие – с использованием стержня Хопкинсона при скорости деформации $3,5 \times 10^3 \text{ с}^{-1}$. Выполненные эксперименты выявили высокую чувствительность к скорости деформации, особенно при низких уровнях деформации, но после достижения деформации 30% предел прочности приближается к значению при квазистатическом нагружении. Упомянутые исследования демонстрируют неоднозначность влияния скорости деформации, но в целом можно констатировать, что возрастание пределов текучести и прочности образцов с увеличением скорости нагружения приводит к значительному улучшению способности поглощения энергии.

Сложность и множество возможных механизмов разрушения преград затрудняет анализ результатов экспериментов. Необходимо отметить большие стоимость и трудоемкость экспериментов. Вместе с тем решение задач ударного нагружения и разрушения комбинированных преград проникающими инденторами остаётся актуальным [7,8]. В связи с этим существует тенденция к расширению применения расчётных методов, к которым относят метод конечных элементов с его программным обеспечением – пакеты Fidesys, Abaqus, DEFORM и др. Центральным вопросом в процессе практического использования метода конечных элементов является корректный выбор моделей деформирования и разрушения материалов, а также определение варьируемых параметров, число которых может измеряться десятками. Таким образом, разработка численных моделей комбинированных преград, обеспечивающих оценку динамической стойкости защиты, и определение зон разрушения при различных условиях ударного воздействия остаётся актуальной задачей.

Современные требования к качеству прогноза последствий удара приводят к необходимости учёта особенностей процессов локального деформирования структурно-неоднородных материалов [9]. Это создает серьезные математические трудности и затрудняет разработку точных аналитических решений инженерного проектирования комбинированных преград для защиты изделий.

В [10] было установлено, что усилие при внедрении индентора в комбинированную преграду, содержащую пористый слой, увеличивалось почти линейно до достижения первого пика усилия, соответствовавшего разрушению отражающего слоя. Затем усилие уменьшалось до минимума и снова увеличивалось, достигая второго пика. После достижения второго пика усилие уменьшалось вплоть до завершения испытаний. Авторы [10] оценили влияние различных факторов на кривую «усилие – перемещение». Так более толстый отражающий слой приводил к большим значениям уровней средней и пиковой нагрузки. Также при увеличении толщины пористого слоя возрастало усилие в случае тонкого отражающего слоя, в то время как при большей толщине отражающего слоя толщина сердечника не играла существенной роли. Удельная поглощаемая энергия увеличивалась в 2-7 раз при двукратном уменьшении толщины пористого слоя с одновременным пятикратным утолщением фронтального слоя.

В работе [11] на одинаковых по конструкции преградах были выполнены эксперименты в квазистатическом (0,02 мм/с) и динамическом режимах (от 70 до 250 м/с). Результаты были использованы для построения зависимости отношения энергий пробития преграды при статическом и динамическом воздействии ударника в широком диапазоне скоростей. Оказалось, что эта зависимость имеет линейный характер.

2. Постановка задачи

Объект исследования - демпфирующее свойство преград, включающих пористые прослойки для поглощения энергии высокоскоростного ударника.

Целью исследования является изучение действия силовых нагрузок на запреградное усилие в конструктивных элементах изделий, снабжённых комбинированными преградами. Поставленная цель достигается серией вычислительного и физического экспериментов.

3. Методика эксперимента

Для исследования процесса внедрения высокоскоростного жёсткого ударника в комбинированную преграду предложена модель, реализованная с помощью устройства (рис. 1). Оно содержит пресс-форму с донной частью 1, ударник 5 и трехслойную преграду, включающую отражающий слой 4, пористый слой 3 и слой 2, задерживающий продукты удара, толщина пористого слоя h при этом варьируется. Для отражающего и задерживающего слоёв выбраны сплавы титана и алюминия. Наружные слои преграды обладают упругопластическими свойствами; слой 3 - пластически сжимаемый материал с варьируемой плотностью.

Процесс взаимодействия жёсткого ударника с преградой разделили на две стадии. В начальной стадии удара наблюдается формоизменение комбинированной преграды, сопровождающееся сжатием пористой прослойки. На стадии сжатия пористого слоя 3 поглощается основная доля кинетической энергии жёсткого ударника. Уплотнение пористого материала приводит к увеличению давления $p(z)$ ударника и усилия $P \leq P_{\max}$.

Случай разрушения донной части пресс-формы по типу «выбивания пробки» на заключительной стадии удара прогнозируется на основе аналитической оценки, учитывающей кинетическую энергию ударника E и свойства пористой прослойки.

Определяется при исходных значениях кинетической энергии E и массы m жёсткого ударника его скорость:

$$V = \sqrt{2E/m}.$$

Работа ударника ΔA при перемещении Δz на стадии уплотнения пористого слоя 3:

$$\Delta A = m \frac{dV}{dt} \Delta z.$$

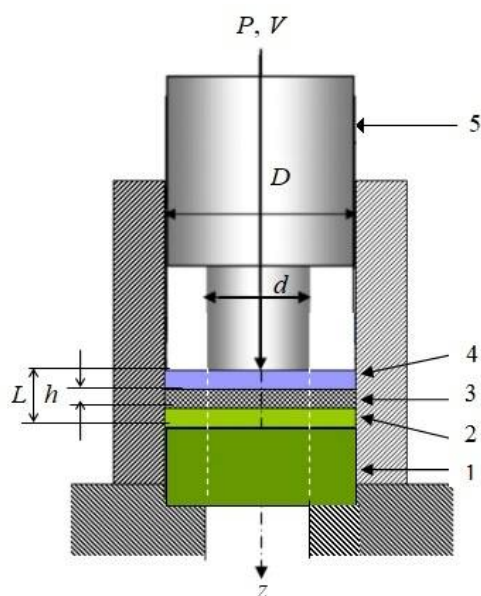


Рис.1. Схема устройства для моделирования удара в комбинированную преграду:

- 1 - донная часть пресс-формы;
 2 - задерживающий слой; 3 - пористая прослойка; 4 - отражающий слой;
 5 - ударник

Давление p сжатия пористой массы определяется соотношением:

$$\frac{p}{\tau_{s3}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \frac{(1 - \vartheta)^{3/2}}{\vartheta^{1/2}}.$$

где τ_{s3} - предел текучести при сдвиге материала прослойки в компактном состоянии, ϑ - относительная пористость прослойки.

Значение относительной пористости ϑ сжимаемой среды в канале пресс-формы является функцией перемещения Δh рабочего пуансона:

$$\vartheta = 1 - \frac{1 - \vartheta_b}{1 - \Delta h / h}.$$

где ϑ_b - исходное значение пористости прослойки 3.

В процессе взаимодействия жёсткого ударника с комбинированной преградой $\bar{\vartheta}_3^* \leq \vartheta_b$, где $\bar{\vartheta}_3^*$ - относительная пористость слоя 3 на стадии пробоя донной части 1 пресс-формы. При этом сила удара $P \rightarrow P_{\max}$.

В случае пробоя части 1 пресс-формы максимальное усилие $P_{\max}$ от жёсткого ударника достигает значения:

$$P_{\max} = \pi \frac{d^2}{4} p_{\max}.$$

Кинетическая энергия при пробое преграды не превосходит работу $A(z)$. При этом $E > E_k \geq 0$, $V_k < V$, где E_k и V_k - кинетическая энергия и скорость ударника для момента окончания процесса взаимодействия жёсткого ударника с комбинированной преградой.

4. Результаты и их обсуждение

В первой части работы в САЕ-пакете с использованием метода конечных элементов выполнили имитационное моделирование запреградных усилий F и формоизменения комбинированной преграды без разрушения донной части пресс-формы. При этом приняли исходные размеры конструктивных элементов: $D = 40$ мм, $20 \geq d \geq 10$ мм, толщина преграды $L \leq 9$ мм, толщина пористого слоя h варьируется, масса ударника $m \leq 10$ кг, энергия удара $E = 0,5$ кДж (в процессе деформирования преграды кинетическая энергия расходуется полностью); температура окружающей среды 20°C . Комбинированная преграда содержит три слоя толщиной 2-5-2 мм. Наружные слои (сплав титана ВТ6 и дюралюминий Д16) обладают упругопластическими свойствами, прослойка - пластически сжимаемые материалы с начальным значением относительной плотности $\rho = 0,6$. Материал прослойки варьируется, в первом варианте - пористый титановый сплав ВТ9, в втором - пористый дюралюминий Д16. Результаты имитационного моделирования показаны на рис. 2, 3 и в табл. 1.

Во второй части выполнен физический эксперимент квазистатического силового нагружения при внедрении цилиндрического индентора в комбинированную трехслойную преграду. Отражающий слой выполнен из титана ВТ-1, задерживающий слой сделан

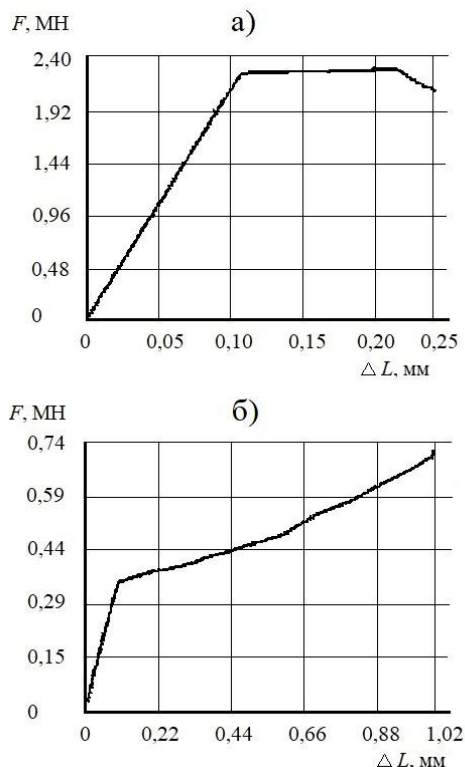


Рис. 2. Зависимость запреградного усилия от внедрения жёсткого ударника в комбинированную преграду с пористой прослойкой из сплава: а) ВТ9, б) Д16

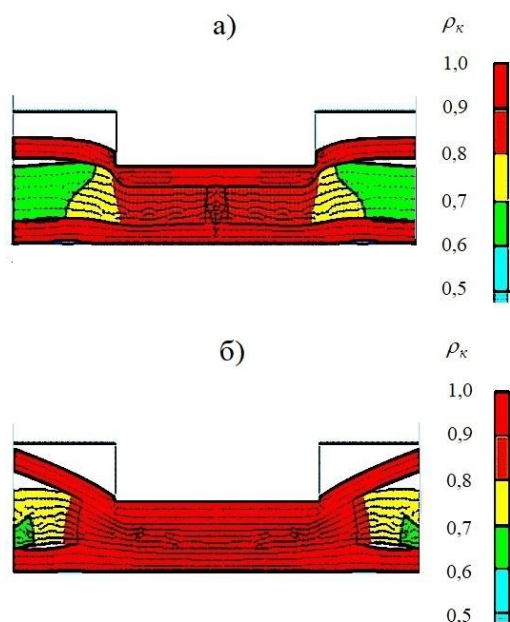


Рис.3. Результат моделирования деформации комбинированной преграды после взаимодействия с жёстким ударником с распределением относительной плотности в преграде из сплава: а - ВТ9; б - Д16

Таблица 1

Результат определения запреградного усилия F и силы $P_{\max}$ ударника

Материал пористого слоя	Относительная плотность в слое после удара ρ_k	Усилие $P_{\max}$ ударника, МН	Запреградное усилие F , МН	Перемещение ударника Δh , мм
Сплав ВТ9	0,62-0,63	2,29	2,22	0,22
Сплав Д16	0,75-0,78	1,85	0,73	1,03

из алюминиевого сплава Д16 с толщинами 2 и 2,9 мм соответственно. У пористого слоя, представленного пеноматериалом на основе алюминия, были исходная толщина 13,35 мм и относительная пористость $\vartheta \approx 0,5$. Сами поры размером $\approx 0,5 \div 1$ мм имели закрытый характер и были равномерно распределены по объему. По химическому составу материал пористого слоя может быть отнесен к группе алюминиевых деформируемых сплавов марки АД, которые отличаются пластичностью и хорошей коррозионной стойкостью. Эксперимент осуществили на испытательной машине INSTRON 8801, оснащенной специальной экспериментальной оснасткой. Ее схема, фотографии образца до и после эксперимента приведены на рис. 4, 5.

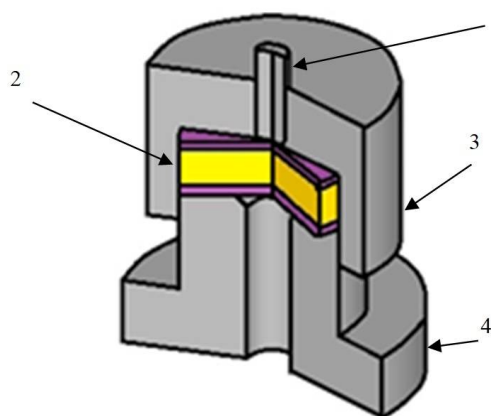


Рис. 4. Схема экспериментальной оснастки для индентирования: 1 – индентор, 2 – многослойная преграда, 3, 4 – верхняя и нижняя части оснастки

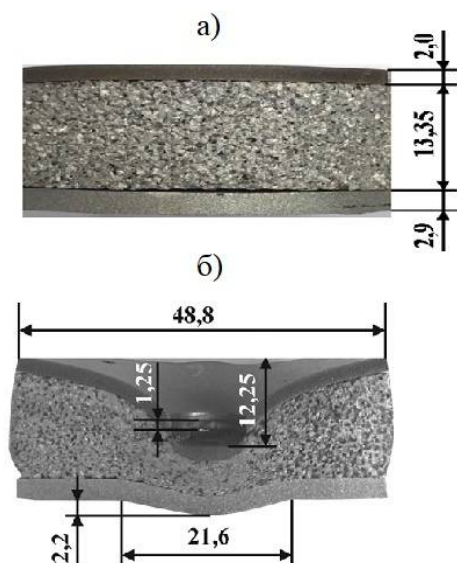


Рис. 5. Образец до эксперимента (а), после эксперимента (б)

Скорость перемещения индентора диаметром 10 мм и плоским торцом составляла 5 мм/мин, глубина внедрения $\approx 12,25$ мм. Эксперимент имитировал частичное пробивание преграды, при котором отражающий слой пробит, но для пробития остальных слоев преграды энергии ударника недостаточно. В ходе эксперимента оценивался спектр трансформаций комбинированной преграды, включающий видимые изменения (деформация и разрушение) и изменение макроструктуры пористого слоя при квазистатическом воздействии индентора. Как видно на рис. 4, средний и задерживающий слои при этом сохраняют целостность, претерпевая некоторую деформацию. Визуально наблюдается существенное уплотнение среднего слоя. Деформация задерживающего слоя в виде образования выпуклой поверхности на момент окончания эксперимента составляла 2,2 мм. На рис. 6 показана диаграмма изменения усилия внедрения P от перемещения индентора Δh . Начало эксперимента характеризуется резким возрастанием усилия, после чего интенсивность скорость возрастания усилия снижается, приобретая линейную зависимость от перемещения индентора. При $\Delta h \approx 11$ мм наблюдается пик усилия, после чего происходит его резкое уменьшение. Очевидно, этот момент связан с разрушением

отражающего слоя преграды по типу «выбивания пробки».

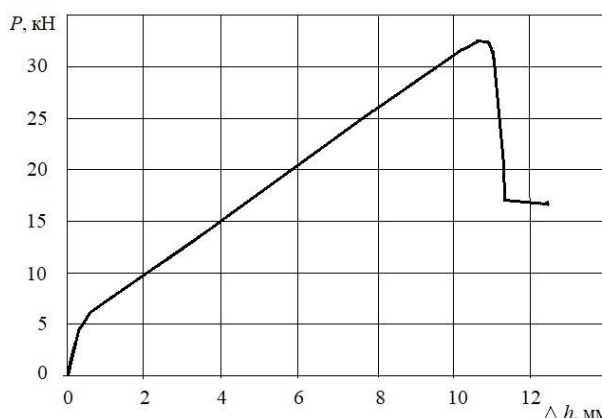


Рис. 6. Диаграмма зависимости усилия P от перемещения Δh индентора

Полученные при индентировании комбинированной преграды экспериментальные результаты частично совпадают с результатами работы [10], в которой изучались механические и энергопоглощающие свойства сэндвич-панелей с пеноалюминиевой сердцевиной ALPORAS и алюминиевыми внешними слоями с применением квазистатических испытания на пробивание комбинированной преграды.

5. Заключение

По результатам моделирования силовых нагрузений и пластической деформации слоёв комбинированной преграды, содержащей пористый слой, при внедрении высокоскоростного жёсткого ударника предложена конструкция преграды для защиты машин и оборудования от ударных нагрузок. Используемые материалы (с учетом их механических свойств) в качестве пористой прослойки и ее размеры могут служить одним из критериев оптимизации конструкции комбинированной преграды, когда минимизируются толщина ее слоёв, вес и стоимость при сохранении гарантированной несущей способности и минимизации запреградных нагрузок. Совместное применение имитационного и физического моделирования конструктивных элементов позволяет прогнозировать живучесть и надёжность конструкций на ста-

дии проектирования изделий машиностроения, при этом существенно сокращаются трудозатраты и стоимость необходимых для выполнения требуемых работ.

Авторы выражают благодарность к.т.н. Вичужанину Д.И. за помощь при проведении физического эксперимента.

Список литературы

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. В.Г. Баженов, А.А. Рябов, С.С. Куканов, С.О. Птицын. Численные и экспериментальные исследования динамического деформирования и разрушения при соударении прямоугольных пластин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2024. № 3. С. 85–96. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.07.
3. Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T, et al. Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading // Scripta Mater. 1999. Vol. 40(8). pp. 921–927.
4. Deshpande V.S., Fleck N.A. High strain rate compressive behavior of aluminum alloy foams // Int. J. Impact Eng. 2000. Vol. 24. pp. 277–298.
5. Lankford, J., Dannemann, K.A. Strain Rate Effects in Porous Materials // MRS Online Proceedings Library. 1998. Vol. 521. pp. 103–108. DOI: 10.1557/PROC-521-103.
6. Alvandi-Tabrizi, Y., Whisler, D.A., Kim, H., Rabiei, A. High strain rate behavior of composite metal foams // Materials Science and Engineering: A. 2015. Vol. 631. pp. 248–257. DOI: 10.1016/j.msea.2015.02.027.
7. Kolmogorov V.L., Zalazinsky A.G., Zalazinskaya E.A. The superdeep penetration of a particle into an elastic-plastic medium // International Journal of Impact Engineering. 2007. Vol. 34. Issue 11. pp. 1869–1882.
8. Agapitova O.Y., Dvoynikov D.A., Zalazinsky A.G., Nesterenko A.V., Titov V.G., Shveikin V.P. Simulation modeling and improvement of the design of a combined barrier

Работа выполнена в соответствии с государственным заданием ИМАШ УрО РАН с использованием оборудования ЦКП «Пластометрия».

References

1. Kablov E.N. Strategic directions for the development of materials and technologies for their processing for the period up to 2030. *Aviationnnyye materialy i tekhnologii*. 2012. No. 5. pp. 7–17. (In Russian).
2. V.G. Bazhenov, A.A. Ryabov, S.S. Kukanov, S.O. Ptitsyn. Numerical and experimental studies of dynamic deformation and fracture in the collision of rectangular plates. *Vestnik Permskogo natsionalnogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2024. No. 3. pp. 85–96. DOI: 10.15593/perm.mech/2024.3.07. (In Russian).
3. Mukai T, Kanahashi H, Miyoshi T. Experimental study of energy absorption in a close-celled aluminum foam under dynamic loading. *Scripta Mater*. 1999. Vol. 40(8). pp. 921–927.
4. Deshpande V.S., Fleck N.A. High strain rate compressive behavior of aluminum alloy foams. *Int. J. Impact Eng*. 2000. Vol. 24. pp. 277–298.
5. Lankford, J., Dannemann, K.A. Strain Rate Effects in Porous Materials. *MRS Online Proceedings Library*. 1998. Vol. 521. pp. 103–108. DOI: 10.1557/PROC-521-103.
6. Alvandi-Tabrizi Y., Whisler D.A., Kim H., Rabiei A. High strain rate behavior of composite metal foams. *Materials Science and Engineering: A*. 2015. Vol. 631. pp. 248–257. DOI: 10.1016/j.msea.2015.02.027.
7. Kolmogorov V.L., Zalazinsky A.G., Zalazinskaya E.A. The superdeep penetration of a particle into an elastic-plastic medium. *International Journal of Impact Engineering*. 2007. Vol. 34. Issue 11. pp. 1869–1882.
8. Agapitova O.Y., Dvoynikov D.A., Zalazinsky A.G., Nesterenko A.V., Titov V.G., Shveikin V.P. Simulation modeling and improvement of the design of a combined barrier to shock loading. *Metallurgist*. 2025. No. 2.

to shock loading // Metallurgist. 2025. No. 2. pp. 112–116.

9. Залазинский А.Г. Пластическое деформирование структурно-неоднородных материалов. Екатеринбург: ИМАШ УрО РАН, 2000. 492 с.

10. Ruan, D., Lu, G. and Wong, Y.C. Quasi-Static Indentation Tests on Aluminium Foam Sandwich Panels // Composite Structures. 2009. Vol. 92. pp. 2039-2046. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.11.014.

11. Weihong Hou, Feng Zhu, Guoxing Lu, Dai-Ning Fang. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminum foam core // International Journal of Impact Engineering. 2010. Vol. 37(10). pp. 1045-1055. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.03.006.

‡ pp. 112–116.

‡ 9. Zalazinsky A.G. *Plasticheskoe deformirovanie strukturno-neodnorodnykh materialov* [Plastic deformation of structurally heterogeneous materials]. Yekaterinburg: IES UB RAS. 2000. 492 p. (In Russian).

‡ 10. Ruan, D., Lu, G. and Wong, Y.C. Quasi-Static Indentation Tests on Aluminium Foam Sandwich Panels. *Composite Structures*. 2009. Vol. 92. pp. 2039-2046. DOI: 10.1016/j.compstruct.2009.11.014.

‡ 11. Weihong Hou, Feng Zhu, Guoxing Lu, Dai-Ning Fang. Ballistic impact experiments of metallic sandwich panels with aluminum foam core. *International Journal of Impact Engineering*. 2010. Vol. 37(10). pp. 1045-1055. DOI: 10.1016/j.ijimpeng.2010.03.006.