

ОТРАБОТКА УЗЛА ГЕРМЕТИЗАЦИИ ДЛЯ МЕТАТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ СИЛ СОПРОТИВЛЕНИЯ БЕТОННОЙ МИШЕНИ ВНЕДРЕНИЮ УДАРНИКА

М.Ю. Сотский¹, В.А. Велданов¹, В.А. Марков¹, А.Ф. Овчинников¹,
В.И. Пусев¹, В.В. Селиванов¹, А.Н. Сообщи́ков¹, Ю.М. Сотский²

¹МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия
e-mail: msotsky.bmstu@mail.ru

²ЗАО “Интеллектуальные технологии”, Москва, Россия

Показана возможность применения технологии пьезоакселерометрии для определения динамических механических свойств бетонных сред при скорости взаимодействия до 300 м/с. В лабораторных условиях реализован частный проводной вариант технологии акселерометрии терминальной баллистики в результате отработки узла герметизации метательной установки.

Ключевые слова: терминальная баллистика, пьезоакселерометрия, уплотнение, механические свойства, динамика, бетон, горные породы.

DEVELOPMENT OF A SEALING UNIT OF BALLISTIC INSTALLATION DURING THE STUDY OF CONCRETE TARGET RESISTANCE TO PROJECTILE PENETRATION

M.Yu. Sotskiy¹, V.A. Veldanov¹, V.A. Markov¹, A.F. Ovchinnikov¹,
V.I. Pusev¹, V.V. Selivanov¹, A.N. Soobshchikov¹, Yu.M. Sotskiy²

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia
e-mail: msotsky.bmstu@mail.ru

²ZAO “Intellectual Technologies”, Moscow, Russia

The possibility of application of piezoelectric accelerometer technology for determination of dynamic mechanical properties of concrete media at a speed of interaction up to 300 m/s is shown. A particular wired-version case of the technology of terminal ballistics accelerometry is implemented under laboratory conditions as a result of development of the sealing unit of the ballistic installation.

Keywords: terminal ballistics, piezoelectric accelerometry, sealing, mechanical properties, dynamics, concrete, rocks.

Актуальной задачей в области исследования фундаментальных свойств бетонных сред и горных пород является исследование влияния динамических нагрузок на их механические свойства. Исследуемые среды являются основным конструкционным материалом инфраструктурных объектов, инженерных сооружений и их оснований. Объединены эти искусственные и природные структурно-неоднородные материалы (среды) принадлежностью к классу разносопротивляющихся материалов [1]. Большое разнообразие материалов, объектов и вариантов динамического воздействия определяет заинтересованность в экспериментальном определении необходимых зависимостей и коэффициентов в инженерных и численных моделях описания и расчета

процессов динамического деформирования и разрушения рассматриваемых материалов [2, 3]. Любой частный вариант конструкции динамического объекта, конструкционного материала или характеристик источника динамического воздействия вносит в примененную модель материала или математического описания этого частного процесса свои особенности. Для адекватного и неискаженного описания рассматриваемого частного процесса разработанные для него расчетные модели неизбежно требуют тщательного тестирования и верифицирования [4, 5].

Кафедра “Высокоточные летательные аппараты” МГТУ им. Н.Э. Баумана имеет продолжительный опыт проведения фундаментальных и прикладных исследований в области определения динамических механических свойств реологических материалов и использования полученных данных для решения прикладных задач. Диапазон исследований охватывает как классические задачи терминальной (конечной) баллистики, так и возникающие варианты задач исследования свойств поверхности космических объектов или предотвращения астероидной опасности [6, 7]. Кафедра имеет также приоритет в разработке технологий акселерометрии терминальной баллистики (ТБА-технологий) [8]. Обзор публикаций по исследованию свойств бетонных сред и горных пород и разработке частных вариантов ТБА-технологий представлен в ряде работ, например [8–10]. Известные результаты регистрации замедлений ударников в бетонных мишенях изложены в работах [11–13], а измерительные технологии базируются на размещении в ударниках автономных регистраторов данных об отрицательных ускорениях ударника при проникании в мишень. Развиваемые ТБА-технологии базируются на использовании различных вариантов систем обеспечения непрерывной электрической связи стационарной регистрирующей аппаратуры с малогабаритным пьезоакселерометром, размещаемым в ударнике (НЭС-систем [8, 9]). В варианте, примененном для исследования сил сопротивления бетонной мишени внедрению ударника [14], в качестве метательного устройства использована пневматическая баллистическая установка, содержащая узел герметизации камеры высокого давления [15], который прошел тестирование в ходе проведения лабораторных испытаний.

Узел уплотнения камеры высокого давления баллистической установки относится к области средств и технологий обеспечения требуемых значений давления в сосудах высокого давления. С применением этих средств достигается герметизация сосуда путем обеспечения непроницаемости его стенок и соединений для жидкостей и газов и

применения уплотнений. В частности, сосуды содержат узлы герметизации для создания необходимых параметров давления газообразного рабочего тела, воздействующего на разрушаемый или деформируемый элемент. В простейших случаях мембранный узел герметизации выполняется в виде диафрагмы (мембраны), закрывающей выполненное в сосуде отверстие, притянутой болтами через замкнутый прижимной элемент к фланцу отверстия и разрушающейся при достижении в сосуде заданного давления.

В баллистических установках (метательных устройствах для сообщения скорости метаемым элементам: ударникам, летательным аппаратам), выполняемых по традиционной схеме, камера высокого давления — это сосуд высокого давления преимущественно в форме цилиндра с торцевыми фланцами. Один из фланцев подсоединяется через диафрагму с уплотнением встык к разгонному элементу метательного устройства, например к стволу баллистической установки. Другой, противоположный фланец может быть либо заглушен, либо снабжен крышкой, закрепляемой через уплотнительные элементы на фланце. Мембранный диафрагменный узел в камере с отверстием, соединенной через диафрагму с каналом ствола, представляет собой узел или устройство герметизации. В совокупности узел герметизации и фланцевые элементы образуют стыковочный узел.

Давление газообразного рабочего тела в камере высокого давления баллистической установки создается компрессором. Газ воздействует на стенки камеры, стыковочный узел и устройство герметизации, при этом на болты воздействует дополнительная сила растяжения, приводящая к упругому или пластическому деформированию болтов, их растяжению. Когда давление в камере достигает заданного значения, происходит разрушение диафрагмы.

Герметизация достигается путем установки уплотнительных элементов, сжатия их силой затяжки болтового соединения до достижения упругих или пластических деформаций материала этих элементов и заполнения зазоров между сжимающимися элементами и внутренней поверхностью элементов фланцевого соединения. Заполнение зазоров должно обеспечить герметизацию камеры, т.е. исключение возможности прорыва газов в диапазоне заданных значений рабочего давления.

Проведение каждого опыта серии требует расстыковки камеры высокого давления со стволом баллистической установки, сборки и установки мембранного и стыковочного узлов, состыковки узлов баллистической установки и затяжки болтового соединения. Известные устройства уплотнения монтируются на стволах баллистических установок после размещения метаемого элемента в канале ствола и перед

операциями установки диафрагмы или крышки камеры высокого давления. В баллистических установках для метания элементов малых калибров сборка и монтаж камеры высокого давления и устройств уплотнения проводится без значительных затруднений вследствие малой массы деталей оснастки и узлов, допускающей ручной монтаж. При необходимости метания маломасштабных моделей, представляющих собой метаемые элементы большого диаметра (100 мм и более) и массы, значительно возрастают геометрические размеры, а следовательно, массы как камеры высокого давления, так и уплотнительных устройств. Возрастание массы примерно пропорционально кубу соотношения диаметров канала ствола.

Маломасштабные модели натуральных конструкций являются их геометрически подобными макетами. Размеры модели обеспечивают возможность размещения внутри специальных пьезоакселерометров серии А1М [9] или промышленных ударных акселерометров. Кроме того, такие размеры предоставляют возможность и для более детального моделирования элементов внутреннего оборудования моделей сложных летательных аппаратов. Если соотношение размеров натурной конструкции и ее маломасштабной модели не превышает 10, то модель считается полунатурной моделью [16] исследуемой натурной конструкции. Требования обеспечения равенства скоростей перемещения натурной конструкции и ее модели при проведении полунатурных испытаний также приводят к необходимости увеличения размеров камеры высокого давления и толщины корпусных деталей для достижения метаемой моделью заданного диапазона скоростей.

При проведении серии опытов в полунатурных испытаниях монтаж и демонтаж массивной камеры высокого давления и устройств уплотнения становится трудоемкой операцией. При необходимости герметизации известной камеры высокого давления с торцевой крышкой и внутренним диаметром 250 мм при давлении 15 МПа по расчетам необходимо установить не менее 23 болтов М30.

Разработанное устройство [15] обеспечивает проведение опытов в полунатурных испытаниях без применения специальных монтажных устройств и оснастки. При эксплуатации устройства повышаются возможности полунатурных испытаний и увеличивается производительность отработки и проведения опытов в испытаниях за счет исключения необходимости монтажа-демонтажа массивной камеры высокого давления.

Устройство герметизации камеры высокого давления баллистической установки, показанное на рис. 1, а, выполнено в виде двух сборок. Первая — мембранная сборка из диафрагмы с прокладкой притянута

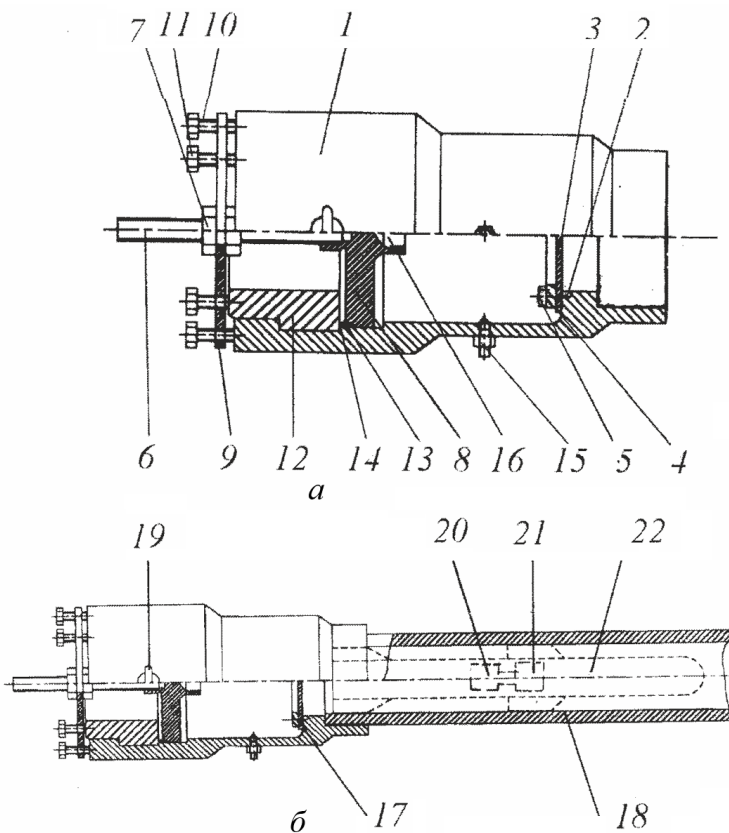


Рис. 1. Устройство герметизации камеры высокого давления баллистической установки:

a — базовый вариант разработанного устройства; *б* — устройство герметизации камеры высокого давления в сборе со стволом баллистической установки; 1 — корпус; 2 — уплотняющая прокладка; 3 — диафрагма; 4 — прижимное кольцо; 5 — элементы крепления; 6 — направляющая винтовая ось; 7 — гайка; 8 — опорный диск; 9 — установочный диск; 10 — первая группа болтов-толкателей; 11 — вторая группа болтов-толкателей; 12 — упорное кольцо; 13 — уплотнительное кольцо; 14 — нажимное кольцо; 15 — штуцер; 16 — гнездо узла формирования импульса давления; 17 — уплотнительная прокладка; 18 — ствол баллистической установки; 19 — рым-болт; 20 — бортовой узел НЭС-системы; 21 — измерительный узел с пьезоакселерометром; 22 — модель летательного аппарата с внутренним оборудованием

прижимным кольцом к внутренней поверхности переднего фланца камеры высокого давления. Передний фланец камеры внешней поверхностью обращен к казенной части ствола баллистической установки, предназначенной для размещения метаемой полунатурной модели. Вторая — уплотнительная сборка с кольцеобразным уплотнительным элементом размещена в противоположном фланце камеры.

Внутри корпуса между опорным диском и упорным кольцом размещены уплотнительное и нажимное кольца. Уплотнительное кольцо перекрывает зазор между опорным диском и цилиндрической внутренней поверхностью корпуса и герметизирует внутренний объем корпуса

камеры, ограниченный диафрагмой, опорным диском и цилиндрической внутренней поверхностью корпуса. Этот объем определяет рабочий объем камеры высокого давления баллистической установки и предназначен для заполнения его через штуцер газообразным рабочим телом с применением компрессора или из баллона. Предусмотрена также возможность повышения давления в этом объеме в случае применения узла формирования импульса давления, размещаемого в гнезде.

Отработка узла уплотнения заключается в опробовании конструктивных вариантов и подборе материалов и характеристик элементов уплотнения в камере высокого давления баллистической установки. Варианты и характеристики должны обеспечивать давление разрушения диафрагмы, придающее метаемой сборке с ударником начальную скорость удара в диапазоне 250. . . 300 м/с. Модель, выполненная с заданными характеристиками ударника и окружающих его элементов, при этих скоростях внедряется в изготовленную из бетона мишень либо пробивает ее.

Как показано на сборочном чертеже (рис. 1, б), корпус камеры высокого давления скреплен через уплотнительную прокладку со стволом баллистической установки. В прилегающей к камере (казенной) части ствола размещается полунатурная модель летательного аппарата исследуемой конструкции с элементами и узлами внутреннего оборудования, измерительной системы и системы непрерывной передачи данных (изображены штриховой линией).

Баллистическая установка, как это видно на рис. 2, с внутренним диаметром ствола 100 мм и длиной ствола 6000 мм смонтирована в тросовых подвесах, что уменьшает механическое воздействие на фундамент и здание при эксплуатации установки.

Уплотнительное кольцо изготовлялось, как показано на рис. 3, из металла или пластических материалов. Варианты примененных диафрагм и характерные виды их деформирования и разрушения, а также характерный вид разрушения бетонных мишеней представлены на рис. 3 и 4.

В реализованном варианте устройства рабочий объем камеры составил 10 дм³. Требуемое значение давления разрушения диафрагмы, определяющее заданную скорость модели, достигается подбором толщины диафрагмы либо выполнением ослабляющих диафрагму подрезов. Остальные элементы конструкции реализованного варианта устройства выполнены из прочной легированной стали. Рабочее давление до 15 МПа обеспечивается применением диафрагм, изготовленных из сплавов алюминия, например, АМг, А1 или Д16.



Рис. 2. Вид в направлении ствола баллистической установки на камеру высокого давления в закрытом состоянии

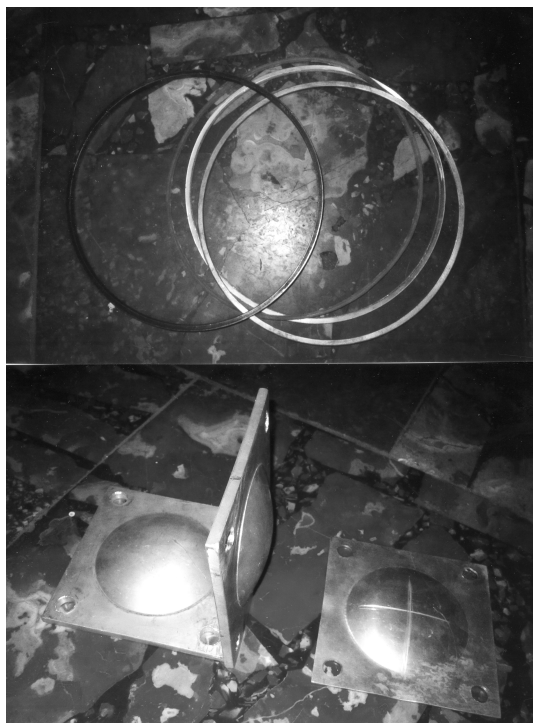


Рис. 3. Нажимное кольцо (вверху слева) и уплотнительные кольца из пластика, алюминия и меди, внизу — вид диафрагм толщиной 8 и 2 мм из алюминиевых сплавов при давлениях ниже давления разрушения

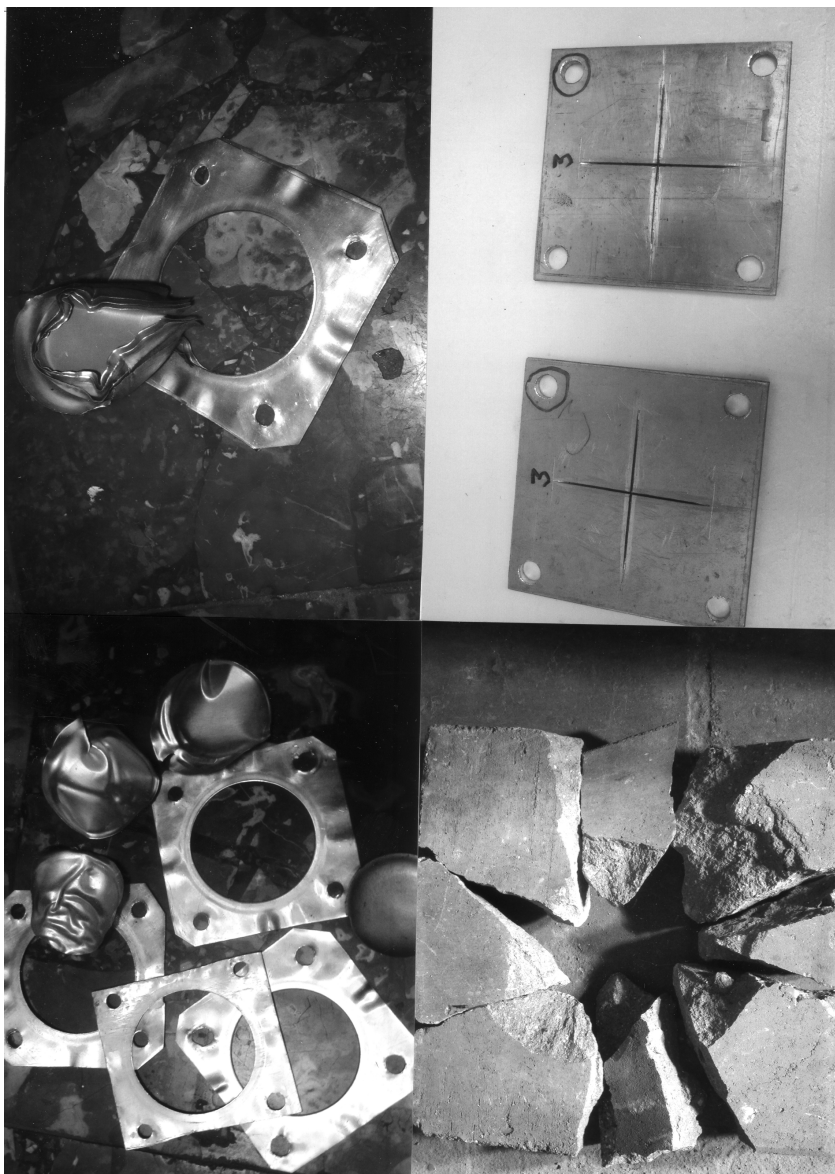


Рис. 4. Вариант исполнения диафрагм с предварительной насечкой (справа внизу), характерный вид разрушения единичных и многослойных диафрагм (вверху) и бетонных мишеней (слева внизу)

Диафрагму с прокладкой закрепляют прижимным кольцом к внутренней торцевой поверхности корпуса элементами крепления, применяя болтовую стяжку в выполненных с резьбой глухих отверстиях во фланце корпуса камеры, прилегающем к каналу ствола установки. В противоположном торцевом фланце корпуса (1) камеры вырезаны шесть симметрично расположенных под углом 30° друг к другу пазов (см. рис. 2). На внешней цилиндрической поверхности упорного кольца выполнены шесть симметрично расположенных под углом 30° друг к другу выступов, по размерам и форме соответствующих пазам во фланце. В качестве рабочего тела использован сжатый воздух.

Были проведены испытания работоспособности устройства герметизации в диапазоне давлений, превышающем рабочий, за счет установки выполненной из стали заведомо не разрушаемой диафрагмы. Испытания с применением аппаратурных измерений методами акустической эмиссии зафиксировали работоспособность устройства при повышении давления до 1,4 рабочего.

По варианту ТБА-технологии [14] проведена серия опытов с регистрацией баллистических параметров метаемой модели при ее движении на траектории (начальной скорости удара) и в бетонной мишени (история замедления ударника в мишени). Для недеформируемых ударников сила сопротивления прониканию пропорциональна замедлению. На рис. 5 показан вариант модели, состоящей из четырех основных элементов. Масса метаемой измерительной сборки с моделью составляла свыше 2 кг, а сообщаемая модели скорость в опытах регистрировалась в диапазоне 200...250 м/с. Для такой сборки скорость метания может быть увеличена с применением более прочных диафрагм. Для сборок меньшей массы возможна скорость метания до 800 м/с.

На рис. 6 показаны основные элементы баллистической трассы, где перед бетонной мишенью установлены рам-мишени для измере-



Рис. 5. Вариант модели летательного аппарата в состоянии предварительной сборки; слева-направо:

инертный элемент, основание измерительного узла, ударник, наконечник

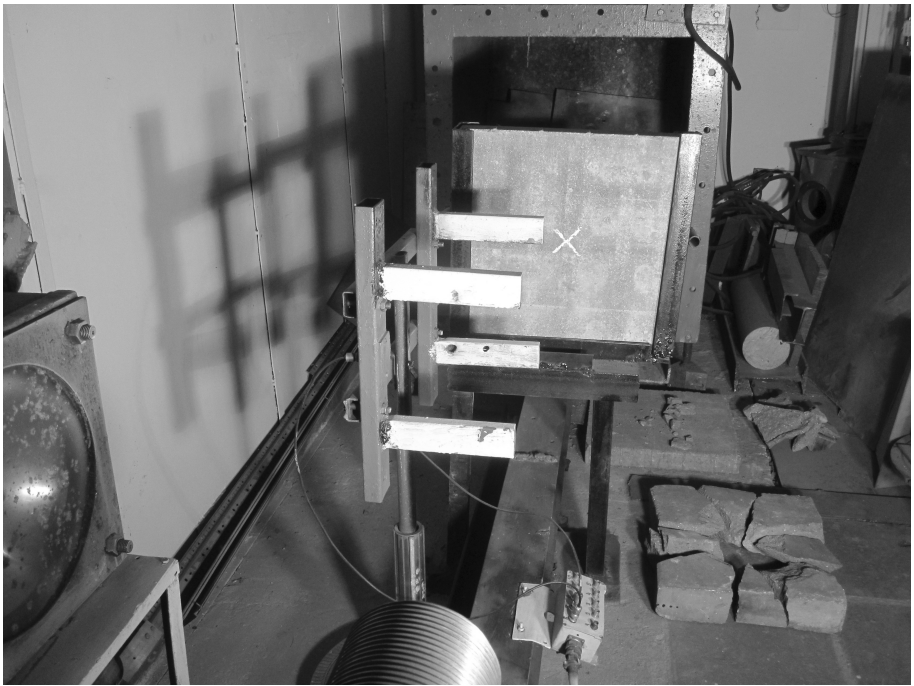


Рис. 6. Вид баллистической трассы в направлении от дульного среза ствола

ния начальной скорости удара, позади мишени подвешенное на тросах антирикошетное улавливающее устройство, в нижней части перед мишенью закреплен блок коммутации каналов электрической связи НЭС-системы [14] к измерительной цепи и регистратору.

Ударник диаметром 45 мм выполнен толстостенным с внутренней полостью, заполненной пастообразным наполнителем. Масса ударника составляла 0,6 кг. В диапазоне скоростей, реализуемых при проведении опыта, и при пробитии бетонных мишеней толщиной 40 и 50 мм ударник не испытывал пластических деформаций, а пьезоакселерометр сохранял работоспособность. После остановки в улавливающем устройстве, как следует из рис. 7, ударники получали остаточные пластические деформации. Состояние элементов модели до и после проведения опыта также показано на рис. 7.

Вид деформирования зависит от остаточной скорости ударника после пробития бетонной мишени и условий его подхода к останавливающим антирикошетным элементам улавливающего устройства.

Результаты проведенного исследования показали возможность получения данных о замедлении ударника в бетонных средах и горных породах с помощью пьезоэлектрических акселерометров и разработанных метательных устройств в опробованном диапазоне начальных скоростей удара до 300 м/с. Предусматривается также возможность использования примененных измерительных технологий и устройств



Рис. 7. Состояние ударника до (крайний слева) и после проведения опыта; слева в центре на фото — измерительный узел на основании (после проведения опыта); справа — виды деформирования ударников после остановки в улавливающем устройстве

для исследования динамических механических свойств сотовых конструкций из алюминиевых сплавов. Обработка получаемых данных позволяет не только определять динамические характеристики сопротивляемости разносопротивляющихся материалов прониканию и деформированию, но также дает возможность тестирования расчетных методик и их уточнения, в том числе задач численного моделирования [8, 9]. Показатели динамических механических свойств бетонных сред и горных пород определяются экспериментально-расчетным путем с использованием результатов измерений. В лабораторных условиях отработаны измерительные технологии (частные варианты ТБА-технологий), которые базируются на применении оригинальных металлических и ведущих устройств [15] для ударников, снабженных измерительными устройствами [14] для непрерывной фиксации кинематической характеристики (замедления) твердого или малодеформируемого тела в процессе высокоскоростного удара.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 13-08-00274-а и проект 13-08-00383-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Садырин А.И., Пирогов С.А. Внедрение жестких ударников в малопластичные хрупко разрушающиеся среды // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. № 4. Ч. 4. С. 1747–1749.
2. Безгодов И.М., Цветков К.А. Методические особенности исследования деформативно-прочностных характеристик бетона при динамическом нагружении в условиях сложного напряженного состояния // Электронный журнал “Предотвращение аварий зданий и сооружений”. (свидетельство Эл № ФС 77-35253 от 16.02.2009 г.). Дата публикации: 08.04.2010. URL: <http://www.pamag.ru/pressa/issledovanie-dph-betona> (дата обращения 01.11.2012).
3. Silling S.A., Forrestal M.J. / Mass loss from abrasion on ogive-nose steel projectiles that penetrate concrete targets // Int. J. Imp. Engng. 2007, vol. 34, no. 11, pp. 1814–1820.

4. *A spherical cavity expansion model for penetration of ogival-nosed projectiles into concrete targets with shear-dilatancy* / He, Tao, Wen, He-Ming, Guo, Xiao-Jun // *Acta Mechanica Sinica*. 2007, vol. 27, no. 6, pp. 1001–1012.
5. *Heider N., Thoma K., Klomfass A.* / Simulation of geopenetrator impact in the high velocity regime // *Proc. 23th Int. Symposium on Ballistics*. (Tarragona (Spain), 16–20 April 2007.). Tarragona (Spain). 2007, pp. 1553–1559.
6. *Galimov E.M., Veldanov V.A., Khavroshkin O.B.* Cosmogonic researches — change of the paradigm: high-velocity penetrator. Penetrometry in the Solar System II // *Proc. of the Int. Workshop held in Graz (Austria, September 25–28, 2006)*. Austrian Academy of Sciences Press, Vienna. 2009, pp. 233–250.
7. *Geological and geochemical complex Moon investigation* / V.A. Veldanov, A.Yu. Dauriskikh, O.B. Khavroshkin, V.V. Tsyplakov // *Abstracts European Planetary Science Congress. Vol. 5. Rome (Italy), 2010* // [meetings.copernicus.org: European Planetary Science Congress](http://meetings.copernicus.org/European%20Planetary%20Science%20Congress). URL:<http://meetingorganizer.copernicus.org/EPSC2010/EPSC2010-795.pdf> (дата обращения: 15.06.2010).
8. *Deceleration — time measured projectile penetration tendency in qualitatively different terminal ballistics processes* / M.Ju. Sotsky, V.A. Veldanov, A.M. Ruchko, A.Ju. Vasilev, Ju.M. Sotsky // *Proc. 25th International Symposium on Ballistics. Vol. 2. Beijing: China Science and Technology Press, 2010*, pp. 1070–1077.
9. *Расчет проникания недеформируемых ударников в малопрочные преграды с использованием данных пьезоакселерометрии* / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев и др. // *Журнал технической физики*. 2011. Т. 81. Вып. 7. С. 94–104.
10. *Исследование динамических механических свойств алюминиевых сплавов методом акселерометрии* / В.А. Велданов, В.А. Марков, В.И. Пусев и др. // *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*. 2010. № 2. С. 37–46.
11. *Penetration of concrete targets with deceleration-time measurement* / M.J. Forrestal, D.J. Frew, J.P. Hickerson, T.A. Rohwer // *Int. J. Imp. Engng.* 2003, vol. 28, no. 5, pp. 479–497.
12. *Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D.* The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth // *Int. J. Imp. Engng.* 2006, vol. 32, no. 10, pp. 1584–1594.
13. *Present research and development on measurement technology of penetration into hard targets with hard recovery recorder* / Gao Jin-zhong, SUN Yuan-cheng, DU Lian-ming, CHEN Guang-yan, HUAN Yu-chuan // *Proceedings 25th International Symposium on Ballistics. Vol. 2. Beijing: China Science and Technology Press, 2010*, pp. 1187–1192.
14. *Пат. 2413917 РФ, МПК⁷ G01N3/30.* Устройство и способ проводной электрической связи для регистрации параметров функционирования метаемого тела в полном баллистическом цикле / В.А. Велданов, А.В. Жариков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, А.М. Ручко, М.Ю. Сотский, Ю.М. Сотский, В.В. Ткачев / Патентообладатель ГОУ ВПО “Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана”. Оpubл. 10.03.2011. Бюл. № 7.
15. *Пат. 2287756 РФ, МПК⁷ G01N3/30.* Устройство и способ герметизации камеры высокого давления баллистической установки / В.А. Велданов, В.А. Марков, А.Ф. Овчинников, В.И. Пусев, А.Н. Сообшиков, Г.В. Сотская, М.Ю. Сотский, Ю.М. Сотский / Патентообладатель: ГОУ ВПО “Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана”. Оpubл. 27.10.2012. Бюл. № 30.
16. *Кейл А.* Проблемы пластичности корабельных конструкций при взрывном и ударном нагружении // *Механика (Сб. пер.)*. 1964. № 2. С. 107–123.

Статья поступила в редакцию 27.11.2012