

УДК 539.3

УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО СОУДАРЕНИЯ*

© 2013 г.

Вл.Вл. Баландин

НИИ механики Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского

balandin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 17.12.2012

Дано описание модернизированной лабораторной установки для высокоскоростной киносъемки процессов соударения с использованием цифровой камеры HSFCpro при скоростях до 10^3 м/с. Показаны преимущества нового оборудования. Приведены примеры использования установки.

Ключевые слова: ударное взаимодействие, высокоскоростная киносъемка, цифровая камера.

Исследования процессов ударного взаимодействия деформируемых твердых тел с преградами различной физической природы играют важную роль в современной науке и технике. Значительное внимание в проблеме динамики удара уделяется экспериментальным методам изучения ударных явлений, позволяющим устанавливать новые опытные данные и закономерности этих явлений. Исследования процессов ударного взаимодействия требуют наличия нестандартных методик, современного оборудования и приборов для проведения ударных экспериментов и регистрации параметров быстропротекающих процессов как в прямых, так и в обращенных экспериментах. При изучении ударного взаимодействия широко используют различные датчики, установленные в мишени [1, 2] и на ударнике [3–10]. Они позволяют регистрировать отдельные параметры высокоскоростного взаимодействия: силу, ускорение, скорость внедрения, глубину внедрения и т.д. Широкое применение для регистрации процессов ударного взаимодействия нашли высокоскоростная съемка в видимом свете [11–17] и импульсная рентгеновская съемка [17–20]. Подобные методы позволяют не только регистрировать перемещения и формоизменения различных элементов процесса соударения во времени, но и получить общую картину взаимодействия ударника с преградой. В НИИ механики Горьковского (ныне Нижегородского) государственного университета в 80-х годах XX века была разработана и реализована установка для исследования процессов соударения, проникания и пробивания деформируемых твердых тел в широком диапазоне скоростей удара ($50\div 800$ м/с) [21]. В качестве разгонного устройства использовалась газовая пушка калибра 20 мм, регистрация параметров процесса соударения осуществля-

* Выполнено при частичном финансировании РФФИ (гранты 12-05-01075-а и 12-08-01227-а), Минобрнауки РФ (соглашение 14.132.21.1361) и Программой государственной поддержки ведущих научных школ РФ (грант НШ-2843.2012.8).

лась высокоскоростной камерой с зеркальной разверткой типа ВСК-5. Использование этого оборудования позволило проводить широкий круг исследований процессов ударного взаимодействия, однако наряду с достоинствами оно обладало существенными недостатками. Основным недостатком являлась зависимость времени экспозиции каждого кадра t_3 от временного интервала между кадрами t_k ($t_3 = 0,5t_k$), что приводило к большим погрешностям при измерении перемещений. К тому же был достаточно трудоемким процесс обработки экспонированных пленок и измерения по ним параметров процесса. С появлением цифровых многокадровых камер была проведена модернизация данной установки путем замены регистратора на цифровую восьмикадровую высокоскоростную камеру HSFCрго фирмы PCO (Германия).

Схема модернизированной установки приведена на рис. 1.

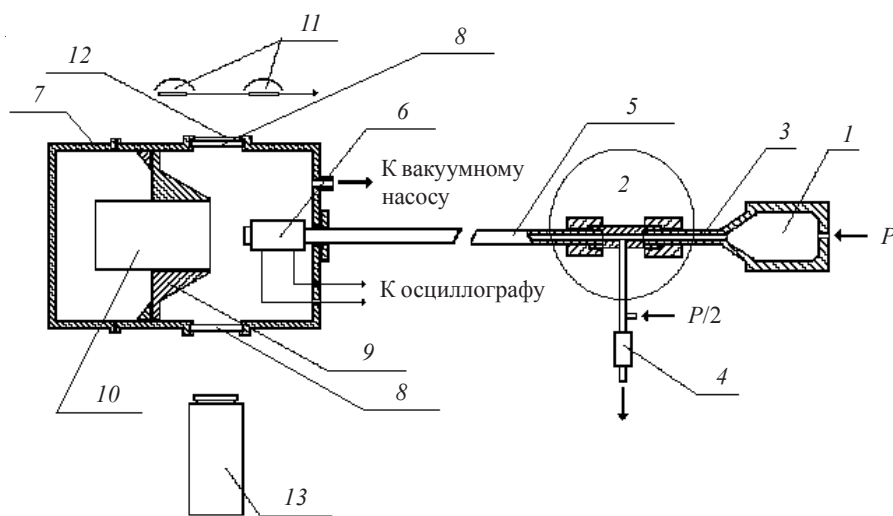


Рис. 1

Для разгона ударников до требуемых скоростей используется газовая пушка калибра 20 мм. Пушка состоит из камеры высокого давления (КВД) 1, двухдиафрагменного затвора 2, соединенного с КВД с помощью короткого патрубка 3, а также электромагнитного пневмоклапана 4, служащего для стравливания рабочего газа из промежуточной камеры затвора при выстреле. В качестве затвора используются две диафрагмы, рассчитанные на половину рабочего давления каждая. К промежуточной камере пристыковывается ствол 5. На дульный конец ствола навинчивается электромагнитный измеритель скорости 6. Ударник размещается в стволе перед диафрагмами. Вакуумная камера 7 с окнами 8 из оргстекла толщиной 10 мм предназначена для предохранения оборудования и персонала от удара разлетающихся осколков или самого снаряда. Кроме того, при испытании грунтовых сред она защищает помещение от разлета частиц грунта и пыли. Вакуумная камера состоит из двух частей, соединенных с помощью специального хомута. Общая длина камеры 1100 мм, диаметр 400 мм. В камере расположены 4 кронштейна узла крепления мишени 9. Этот узел представляет собой захват с четырьмя лапками, зажимающими мишень 10 (на схеме показан вариант с мишенью в виде контейнера с грунтом). Узел крепления способен в небольших пределах (до 10 мм) перемещаться в направлениях, перпендикулярных оси камеры, а также изменять наклон мишени относи-

тельно оси ствола. Это сделано с целью обеспечения юстировки мишенной относительно оси ствола пушки. Процесс соударения освещается с помощью двух осветителей 11 через рассеивающий экран 12 и регистрируется высокоскоростной кинокамерой 13.

Используемая для регистрации процессов соударения высокоскоростная камера HSFCrго фирмы PCO представляет собой аппаратно-программный комплекс, состоящий из оптико-электронного блока и рабочей станции для управления камерой и обработки изображений. Рабочая станция представляет собой персональный компьютер с четырьмя профессиональными процессорами для регистрации и обработки изображения. Каждый процессор связан с оптико-электронным блоком оптоволоконным кабелем, что обеспечивает высокую скорость передачи данных. Оптико-электронный блок состоит из четырех идентичных каналов – однокадровых камер типа Dіcam rго, объединенных в одном корпусе с общей оптической системой. Каждый канал способен работать в двухкадровом режиме при длительности экспозиции более 20 нс. Оптические элементы подобраны с высокой точностью и обеспечивают разномасштабность изображений менее 1%. В качестве входного зрчка использовался объектив Nikkor с фокусным расстоянием 70–200 мм. Основные характеристики каждого канала приведены в таблице.

Таблица

Разрешение ПЗС-матрицы	1280×1024
Минимальное время экспозиции (в однокадровом режиме), нс	3
Минимальное время экспозиции (в двухкадровом режиме), нс	20
Минимальное время задержки между двумя повторными экспозициями (в двухкадровом режиме), нс	500
Максимальное время задержки между двумя повторными экспозициями (в двухкадровом режиме), мс	10

Запуск устройства осуществляется либо по сигналу с контактного датчика, расположенного на поверхности мишени и замыкаемого при ударе, либо от электромагнитного измерителя скорости. Требуемая задержка запуска вводится при помощи генератора Г5-54.

Для освещения регистрируемых процессов используются две профессиональные фотовспышки Bowens 2068 с регулируемой энергией вспышки (максимальная энергия 1500 Дж). Источники света установлены на штативах и могут располагаться как перед вакуумной камерой, так и за ней, что обеспечивает съемку в отраженном и в проходящем свете. Широкие пределы регулирования энергии вспышки позволяют оптимально выбирать экспозицию.

Полученные изображения процессов ударного взаимодействия сохраняются во внутреннем формате камеры, а также в формате BMP, что позволяет производить измерения перемещения элементов процесса взаимодействия в любом подходящем графическом редакторе (например, GIMP).

Описанная установка обладает широкими возможностями регистрации процессов ударного взаимодействия и может быть использована при изучении явлений пробивания преград, проникания ударников в протяженные мишени различной физической природы, а также для изучения поведения материалов при высоких скоростях деформирования и больших степенях деформации (например, в эксперименте Тейлора).

В качестве примера использования установки на рис. 2 приведена кинограмма пробивания титановой мишени стальным шариком диаметром 12 мм. Скорость удара составляла 353 м/с. Мишенью являлась часть цилиндрической оболочки толщиной 2,5 мм. Интервал между кадрами составлял 50 мкс, время экспозиции 0,1 мкс. Остаточная скорость вылета шарика из мишени 129 м/с. Съемка осуществлялась в отраженном свете. Хорошо видно наличие перед шариком 2 выбитой из мишени 1 пробки 3.

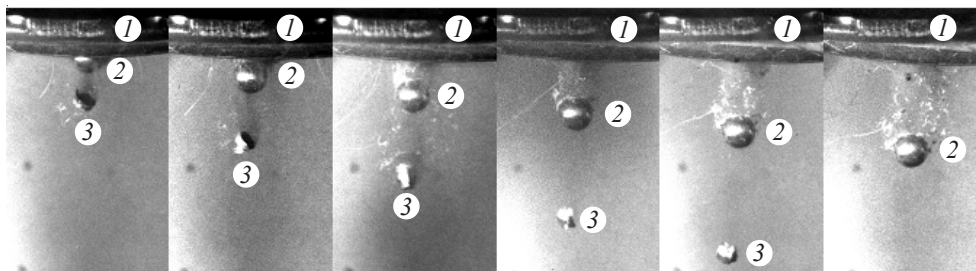


Рис. 2

Из рис. 2 видно, что использование высокоскоростной кинокамеры HSFCрго позволяет получать изображения хорошего качества процессов ударного взаимодействия. Для получения более высокого контраста можно использовать теньевую съемку, которая позволяет с высокой точностью регистрировать контуры процесса. На рис. 3 приведена последовательность кадров взаимодействия отожденного медного ударника диаметром 9,9 мм и длиной 70 мм со стальным мерным стержнем в эксперименте Тейлора. Интервал между кадрами составлял 25 мкс, время экспозиции 0,1 мкс, скорость удара 125 м/с. Запуск регистрации происходил от электроконтактного датчика на поверхности мерного стержня.



Рис. 3

На рис. 4 приведена кинограмма проникания цилиндрического стального ударника с полусферической головной частью в грунтовую среду (сухой песок). Интервал между кадрами 70 мкс, время экспозиции 0,2 мкс. Параметры ударника: длина 100 мм, диаметр 19,8 мм, масса 80 г, скорость удара 216 м/с. Полученные изображения позволяют достаточно точно (погрешность при определении перемещений составляет $0,2 \div 0,3$ мм) построить зависимость глубины проникания ударника от времени (рис. 5) и по данной зависимости определить коэффициент сопротивления внедрению на квазистационарном участке.

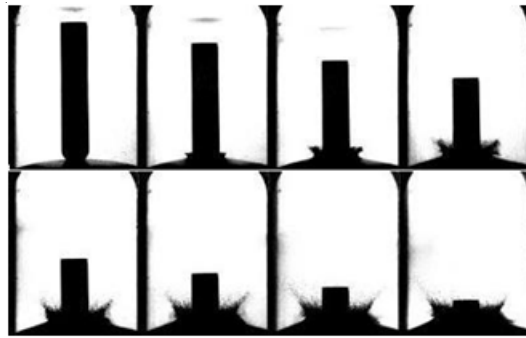


Рис. 4

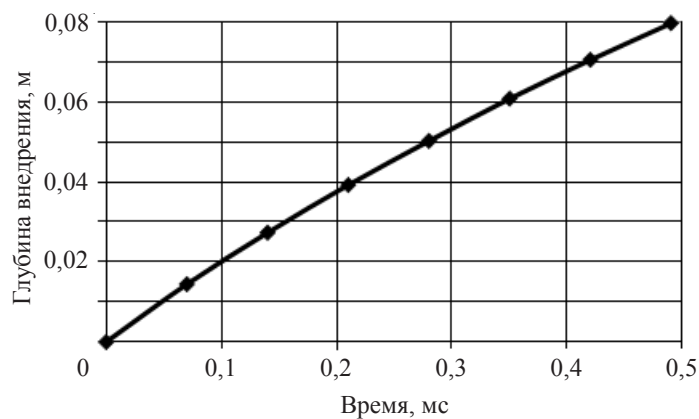


Рис. 5

Выводы

Приведенные примеры применения установки для изучения процессов соударения с использованием многокадровой съемки позволяют сделать вывод о том, что описанная методика может быть с успехом применена как для определения перемещений и скоростей элементов процесса взаимодействия, так и для определения силовых характеристик внедрения твердых тел в преграды различной физической природы.

Список литературы

1. Аллен У., Мэйфилд Э., Моррисон Г. Динамика проникания снаряда в песок // Механика: Сб. переводов. М.: ИЛ, 1957. №6. С. 125–137.
2. Maynard D.K. Projectile impact and penetration dynamics – correlation of analytical and experimental results // Proc. Int. Conf. Fract. Mech. and Technol., Hong Kong. 1977. Vol. 2. Alphen van den Rijn. 1977. P. 1329–1342.
3. Hauver G.E. Penetration with instrumented rods // Int. J. Engng. Sci. 1978. Vol. 16, No 4. P. 871–877.
4. Response of dry and liquid-filled porous rocks to static and dynamic loading by variously-shaped projectiles / C.O. Rogers, S.S. Pang, A. Kumano, W. Goldsmith // Rock Mech. and Rock Eng. 1986. Vol. 19, No 4. P. 235–260.
5. Forrestal M.J., Longcope D.B., Norwood F.R. A model to estimate forces on conical penetrators into dry porous rock // J. Appl. Mech. 1981. Vol. 48, No 1. P. 25–29.

6. Forrestal M.J., Lee L.M., Jenrette B.D. Laboratory-scale penetration experiments into geological targets to impact velocities of 2.1 km/s // *J. Appl. Mech.* 1986. Vol. 53, No 6. P. 317–320.
7. Gas-gun experiments determine forces on penetrators into geological targets / M.J. Forrestal, L.M. Lee, B.D. Jenrette, R.E. Setchell // *J. Appl. Mech.* 1984. Vol. 51, No 3. P. 602–607.
8. Frew D.J., Forrestal M.J., Cargile J.D. The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth // *Int. J. of Impact Eng.* 2006. Vol. 32. P. 1584–1594
9. Бухарев Ю.Н. и др. Экспериментальное исследование проникания недеформируемого ударника в глинистую среду и снег // Прикладные проблемы прочности и пластичности. Анализ и оптимизация: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1991. С. 99–106.
10. Брагов А.М., Грушевский Г.М., Комаров Н.Ю. Влияние шероховатости заполнителя на динамическое поведение бетона // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. / Нижегород. ун-т. 2008. Вып. 70. С. 169–174.
11. Универсальная 9-кадровая установка для высокочастотной фотографии / Н.А. Златин, А.И. Козачук, Г.С. Пугачев, А.Б. Синани // *ЖТФ.* 1983. Т. 58, №6. С. 1154–1159.
12. Фольрат К. Искровые источники света и высокочастотная искровая кинематография // В кн.: Физика быстропротекающих процессов: Пер. с англ. М.: Мир, 1971. С. 96–194.
13. Афанасьев В.И., Захаров В.М. Высокоскоростная кинорегистрация взаимодействия стержневых ударников со слоистой преградой // Современные методы проектирования и отработки ракетно-артиллерийского вооружения: Сб. докл. науч. конф. Волжского регионального центра РАН. Саров, 2000. С. 452–454.
14. Бивин Ю.К. Движение тела вблизи свободной поверхности жидкости или пластической среды // *Изв. РАН. МТТ.* 2001. №3. С. 112–122.
15. Бивин Ю.К., Глухов Ю.М., Пермяков Ю.В. Вертикальный вход твердых тел в воду // *МЖГ.* 1985. №6. С. 3–9.
16. Validation of path-dependent constitutive model for FCC and BCC metals using «symmetric» Taylor impact / S.M. Waley, P.D. Church, R. Townsley, J.E. Field // *Proc. 6th Int. Conf. on Mech. and Phys.: Behavior of Materials under Dyn. Load. Krakov, 2000.* P. 69–74.
17. Зукас Д.А. Динамика удара. М.: Мир, 1985. С. 110–172.
18. Каминский М.В. и др. Результаты экспериментального исследования высокоскоростного внедрения стержня из сплава ВНЖ в плотную среду // II науч. конф. Волжского регионального центра РАН: Аннот. докл. / Саров, 2001. С. 89.
19. Лагунов В.А., Степанов В.А. Измерение динамической сжимаемости песка при высоких давлениях // *ПМТФ.* 1963. №1. С. 88–96.
20. Souque H. Symmetric Taylor testing procedures for material strength ranging from 400 to 2000 MPa // *Proc. 6th Int. Conf. on Mech. and Phys.: Behavior of Materials under Dyn. Load. Krakov, 2000.* P. 179–184.
21. Баландин В.В., Брагов А.М. Лабораторная установка для изучения процессов соударения // Прикладные проблемы прочности и пластичности: Всесоюз. межвуз. сб. / Горьков. ун-т, Горький. 1990. С. 112–115.

A STAND FOR STUDYING HIGH-VELOCITY IMPACT

VI.VI. Balandin

A new modernization of a laboratory stand for rapid filming of impact processes at velocities of 10^3 m/s, using the SFCpro digital camera, is described. Some advantages of the new equipment are shown. Examples of using the new stand are given.

Keywords: impact processes, rapid filming, HSFCpro digital camera.