

Дистанционное зондирование сред

DOI 10.66032/2221-2574-2021-1-3-5-12

УДК 621.37

ИЗМЕРЕНИЕ СКОРОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ УДАРНО НАГРУЖЕННОГО ОБРАЗЦА С ПОМОЩЬЮ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА

Баландин Владимир Васильевич

кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории динамических испытаний материалов НИИ механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

E-mail: balandin@mech.unn.ru

Баландин Владимир Владимирович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник лаборатории динамических испытаний материалов НИИ механики ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

E-mail: vladimir.balandin@mech.unn.ru

Пархачёв Владимир Владимирович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры радиотехники радиофизического факультета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского».

E-mail: vyv@rf.unn.ru

Адрес: 603022, Российская Федерация, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, д. 23.

Аннотация: При исследованиях откольной прочности различных металлов для регистрации профилей скорости свободной поверхности чаще всего используются интерферометрические методы, работающие в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Использование данных методов требует хорошей подготовки поверхности исследуемого образца. В этом отношении большой интерес представляет интерферометр, работающий в миллиметровом диапазоне радиоволн. В данной работе описаны принципы работы радиоинтерферометра, используемого для регистрации перемещения и определения скорости свободной поверхности образца в плосковолновом эксперименте. Для проверки работоспособности методики проведены эксперименты по ударному нагружению образцов из алюминиевого сплава Д16Т. С помощью интерферометра определялась скорость свободной поверхности образца при выходе на неё волны нагрузки. По профилю скорости свободной поверхности определялась откольная прочность исследуемого материала. При сравнении полученных результатов и результатов других авторов, полученных с использованием других методов, получено хорошее соответствие. Сделан вывод о возможности применения данной методики при изучении откольной прочности в плосковолновых экспериментах.

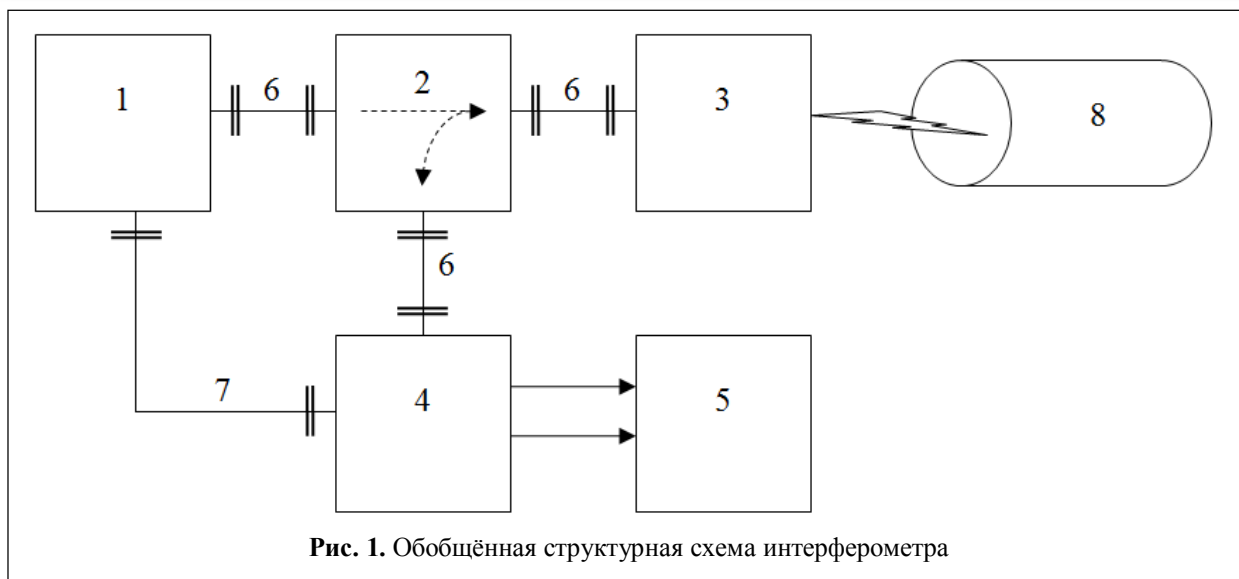
Ключевые слова: радиоинтерферометр, регистрация перемещения, скорость свободной поверхности образца, откольный импульс.

Введение

В процессе эксплуатации несущие и защитные конструкции различной техники в результате природных и техногенных катастроф, террористических актов могут испытывать интенсивные воздействия ударного и взрывного характера. В результате подобных воздействий конструкционные материалы подвергаются дей-

ствию ударных волн. При этом взаимодействие волн нагрузки и разгрузки, возникающих в результате отражения волн сжатия от свободных поверхностей, может привести к откольным разрушениям.

При исследовании откольной прочности различных металлов и сплавов широкое применение нашли интерферометрические методы



измерения скорости движения свободной поверхности образца, под действием выходящей на нее волны нагрузки. Наиболее часто в исследованиях используют интерферометр VISAR [1, 2] и PDV [3, 4], работающие в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Данные интерферометры предъявляют достаточно высокие требования к качеству отражающей поверхности. К тому же бывают случаи, когда зондирующий луч интерферометра плохо отражается от поверхности исследуемого образца, либо отражающая способность поверхности сильно ухудшается в процессе эксперимента. При этом повышение мощности лазерного излучения не всегда приводит к приемлемому результату из-за уменьшения отношения сигнал-шум в регистрируемом сигнале интерференции.

В этом отношении большой интерес представляет интерферометр, работающий в миллиметровом диапазоне длин волн. У данного прибора требования к качеству отражающей поверхности значительно ниже — шероховатость может достигать десятых долей миллиметра, а радиоволны в миллиметровом диапазоне отражаются от поверхности любого проводящего тела. Данные системы нашли применение в исследованиях детонационных процессов [5–8], также известно их применение в баллистическом эксперименте [9]. Понятно,

что данные методы исследования движения имеют некоторые ограничения. Прежде всего, это отсутствие визуализации и большая область засветки, так как антенна интерферометра излучает в достаточно широком телесном угле. Однако для плосковолнового эксперимента, где поверхность образца движется как единое целое на большой площади, это ограничение не является решающим. В данной работе описано применение радиоинтерферометра [6, 7] с длиной волны излучения 3,2 мм для измерения скорости свободной поверхности.

Постановка эксперимента

Интерферометр миллиметрового диапазона — устройство, предназначенное для измерения перемещений и скоростей физических объектов, которые способны отражать радиоволны миллиметрового диапазона. Данный интерферометр реализует схему Майкельсона в радиодиапазоне. Обобщённая структурная схема интерферометра представлена на рис. 1. Он состоит из генератора электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона (1), невзаимного развязывающего устройства — циркулятора (2), антенны (3), приёмного устройства (4) и блока регистрации и обработки данных (осциллографа) (5). Высокочастотные элементы схемы соединены волноводным трактом (6, 7). Исследуемый объект (8) может находиться в

непосредственном контакте с антенной интерферометра, либо на некотором удалении от нее. Среда между антенной (3) и объектом (8) должна быть радиопрозрачной.

Интерферометр работает следующим образом. Создаваемые генератором (1) непрерывные электромагнитные колебания постоянной мощности на фиксированной частоте через элементы волноводного тракта (6) и развязывающее устройство (2) поступают на антенну (3) и излучаются в окружающую среду. Развязывающее устройство — циркулятор (2) предназначено для того, чтобы сигнал с генератора (1) попадал только в антенну (3) и не проходил напрямую в тракт приёмника (4), и в тоже время оно препятствует прохождению принятого антенной (3) сигнала в генератор (1) и направляет этот сигнал в приёмник (4). Если на пути излученных антенной интерферометра радиоволн появляется любое препятствие, происходит их отражение. Часть энергии отражённых от препятствия волн возвращается на антенну (3) и через элементы волноводного тракта (6) и развязывающее устройство (2) поступает на вход приёмного устройства (4). На другой вход приёмного устройства через элементы волноводного тракта (7) с генератора (1) подается опорное колебание, частота которого однозначно связана с частотой излучаемой электромагнитной волны. В приёмном устройстве (4) происходит преобразование принятого с антенны (3) сигнала, продуктом которого является пара квадратурных сигналов на частоте, равной разности частот принимаемых и излучаемых интерферометром радиоволн. Будем называть эту пару квадратурных сигналов интерферограммой. Далее в устройстве регистрации и обработки (5) выполняется обработка в цифровой форме интерферограммы: вычисляется текущая фаза и частота. Результаты вычислений регистрируются как функции времени. При полной регистрации интерферограммы в процессе измерений её обработка может выполняться после завершения эксперимента.

Текущая фаза и мгновенная частота интерферограммы, соответственно, несут информа-

цию о перемещении и мгновенной скорости поверхности, от которой произошло отражение излучаемой интерферометром радиоволны — исследуемого объекта (8). Связь параметров интерферограммы с параметрами движения исследуемого объекта обусловлена эффектом Доплера. В приближении падающего на объект излучения плоской монохроматической волной для поступательно движущейся отражающей поверхности эта связь может быть получена из уравнения для текущей фазы плоской отражённой волны $\varphi(t)$

$$\varphi(t) = \omega_0 t - kx$$

где ω_0 — круговая частота падающей волны; t — текущее время; $k = 2\pi n/\lambda$ — волновое число падающей волны; n — показатель преломления среды, в которой движется объект; λ — длина волны в свободном пространстве; $x = x_0 + V \cdot t$ — расстояние от антенны интерферометра до отражающей поверхности в момент времени t ; x_0 — начальное расстояние от антенны интерферометра до отражающей поверхности, V — скорость движения объекта. Из уравнения следует, что приращение фазы $\Delta\varphi$ за время Δt равно

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - 4\pi n V \Delta t / \lambda,$$

где $\varphi_0 = \omega_0 \Delta t$ — приращение фазы опорного сигнала. Средняя на интервале Δt скорость объекта будет равна

$$V = -(\Delta\varphi / \Delta t - \omega_0) \lambda / 4\pi n,$$

где $\Delta\varphi/\Delta t = \omega(t)$ — мгновенная частота принимаемого сигнала, а разность частот $\{\omega(t) - \omega_0\} = \Omega(t)$ — доплеровский сдвиг частоты принимаемого интерферометром сигнала относительно частоты излучаемого им сигнала.

Если квадратурные составляющие интерферограммы обозначить $Q_s = A \sin[\varphi(t)]$ и $Q_c = A \cos[\varphi(t)]$, то фазу интерферограммы следует оценивать по формуле [10] $\varphi(t) = \arctg[Q_s/Q_c]$.

Наглядно принцип работы радионтерферометра проиллюстрирован на рис. 2.

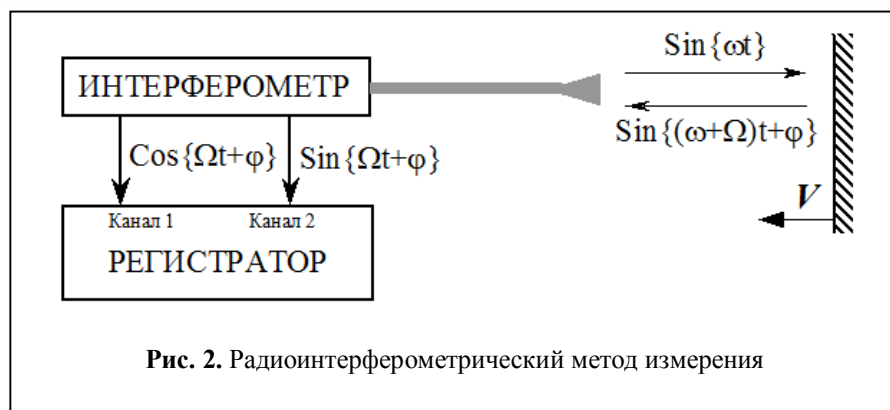


Рис. 2. Радиоинтерферометрический метод измерения

метра измерялся профиль смещения свободной поверхности образца на временном интервале порядка 10 мкс. Затем путём численного дифференцирования строился профиль скорости свободной поверхности образца. Эксперименты проводились с образцами из алюми-

В эксперименте использовался интерферометр с длиной волны 3,2 мм. Рассмотрим схему (рис. 3) подключения антенно-фидерной системы (АФС) радиоинтерферометра к экспериментальной сборке. Исследуемый образец (поверхность металлической пластины, 1) облучается с помощью конического диэлектрического рупора (2) с шириной диаграммы направленности $\pm 15^\circ$ по нулям. Расстояние от торца рупора до исследуемого образца составляет 40 мм. Рупор соединяется с интерферометром посредством тонкого прямоугольного диэлектрического волновода (3). Радиус зоны покрытия исследуемого образца радиоизлучением составляет примерно 10 мм, при радиусе образца 45 мм.

Экспериментальные результаты

Для проверки возможности применимости радиоинтерферометра для откольных исследований в плосковолновом ударном эксперименте была проведена серия из трёх опытов. Условия их проведения приведены в таблице 1. В каждом из опытов с помощью радиоинтерферо-

миниевого сплава Д16Т, свойства которого достаточно хорошо изучены. Образцы диаметром 90 мм и толщиной 10 мм подвергались удару пластиной, изготовленной из того же материала. Поверхности образцов не подвергались шлифовке. Разгон пластины — ударника толщиной h до необходимой скорости осуществлялся с помощью газовой пушки калибром 57 мм [11, 12]. Так как образцы и ударники были изготовлены из одного материала, то максимальное значение массовой скорости U в волне сжатия, возникающей в образце при ударе, равно половине скорости удара V_0 . При выходе волны нагрузки на тыльную поверхность образца скорость свободной поверхности W равна удвоенной массовой скорости U [13], и максимальная скорость свободной поверхности W_1 должна быть близка к скорости удара V_0 , которая измерялась с помощью электроконтактных датчиков. Условия проведения экспериментов и результаты измерений приведены в таблице 1.

Сигналы двух квадратурных каналов интерферометра регистрировались многоканаль-

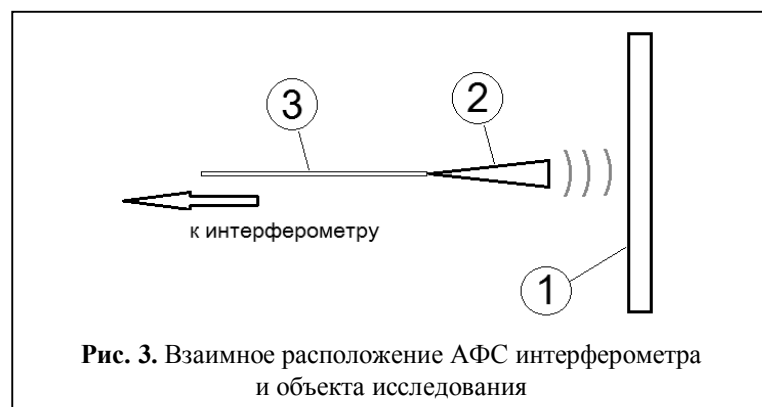


Рис. 3. Взаимное расположение АФС интерферометра и объекта исследования

ным цифровым осциллографом с частотой дискретизации 20 ГГц. Пример интерферограммы, зарегистрированной в эксперименте №140 представлен на рис. 4.

Интерферометр регистрирует биения на временном интервале более 100 мкс. Каждое колебание на интерферограмме соответствует перемещению поверхности исследу-

Таблица 1.

№	V_0 , м/с	h, мм	W_1 , м/с	σ_p , МПа
137	220	3	209	1200
138	242	2+2	232	1300
140	267	5	259	1500

дуемого образца на половину длины волны т.е. на 1,6 мм. Таким образом, интерферометр способен регистрировать большие перемещения, что несомненно является важным достоинством данного метода регистрации.

Профили скорости свободной поверхности W , полученные в опытах, представлены на рис. 5. Так как ствол пушки не вакуумировался, на передней части волновых профилей видно влияние слабой волны сжатия, связанной с воздушной ударной волной перед ударником. Максимальные значения скорости свободной поверхности W_1 приведены в таблице 1 и отличаются от измеренной скорости удара V_0 не более чем на 5%. Длительность импульсов на рис. 5 соответствует удвоенному времени пробега волн по толщине пластин ударников. В эксперименте №138 в качестве пластины ударника использовались два склеенных диска толщиной 2 мм. Так как между ними имелся небольшой зазор $\sim 0,1-0,2$ мм, определявшийся шероховатостью поверхности и наличием клея, то профиль скорости свободной поверхности для этого эксперимента имеет

два максимума, разделённых временем равным примерно одной микросекунде. После максимумов скорости на всех графиках следует быстрый спад за время порядка 1 мкс до минимума скорости W_2 перед так называемым "откольным" импульсом. Далее следует нарастание скорости, связанное с выходом на свободную поверхность откольного импульса, то есть волны сжатия, отражённой от зоны откольного разрушения. Как было отмечено в [2] откольное разрушение сплава Д16Т имеет затянутый характер — откольный импульс имеет очень плавное нарастание.

В экспериментах также определялись мак-

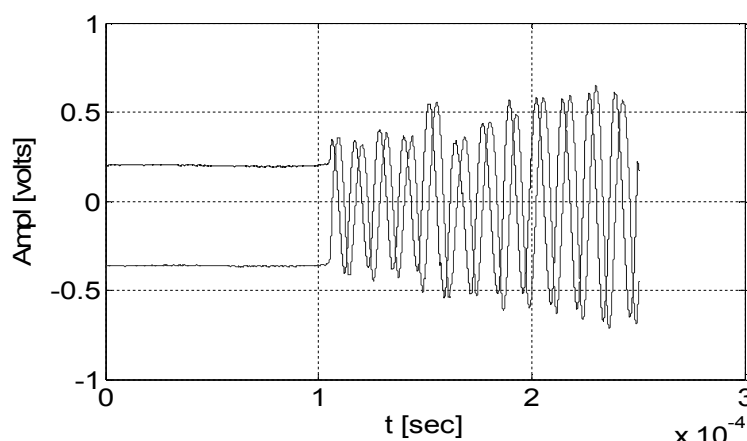


Рис. 4. Экспериментальная интерферограмма

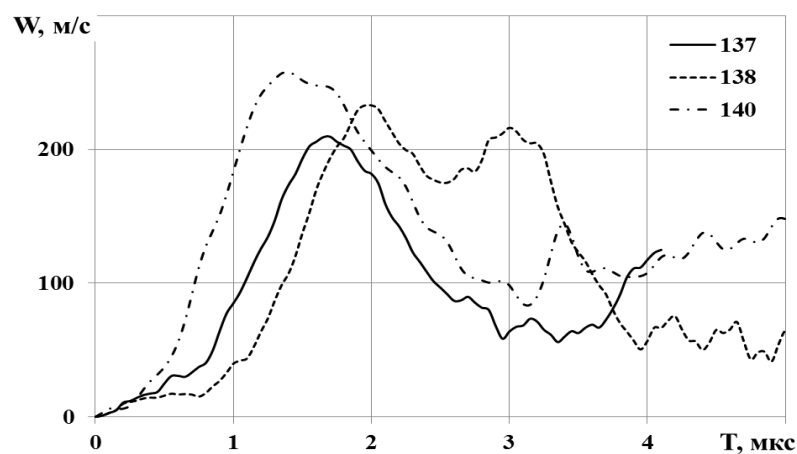


Рис. 5. Профили скорости свободной поверхности

симальные растягивающие напряжения в образце [14]

$$\sigma_p = 0,5\rho_0 c_0 (W_1 - W_2) + \delta,$$

где σ_p — максимальные растягивающие напряжения (при наличии откола σ_p соответствует откольной прочности); ρ_0 — плотность, c_0 — объёмная скорость звука; W_1 — максимальная скорость свободной поверхности; W_2 — скорость свободной поверхности в минимуме перед откольным импульсом; δ — упругопластическая поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скоростей фронта откольного импульса и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним. Однако, как отмечено в [3], в сплаве Д16Т релаксация растягивающих напряжений при отколе происходит столь медленно, что не формируется четко выраженного откольного импульса с изломом в точке перехода от спада скорости к её возрастанию, и поправка $\delta = 0$. Полученные скорости деформации и максимальные растягивающие напряжения для каждого опыта приведены в таблице 1. Следует отметить, что значения откольной прочности, полученные в данных экспериментах, близки к значениям, полученным другими авторами [2, 15].

Выводы

На основании проведённых экспериментов можно сделать вывод о том, что методика определения откольной прочности в плосковолновых экспериментах с использованием радиointерферометра позволяет проводить измерения с достаточной для практических целей погрешностью. Следует также отметить, что отличие максимального значения скорости свободной поверхности W_1 от скорости удара V_0 не превосходит 5%. Данное отличие может быть вызвано как влиянием волны разгрузки, следующей за волной сжатия и постепенно догоняющей её, так и небольшим отклонением ударника от нормали при ударе.

Литература

1. *Barker L.M., Hollenbach R.E.* Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // *J. Appl. Phys.* 1972. DOI: 10.1063/1.1660986
2. *Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Канель Г.И.* Субмикросекундная прочность алюминиевого сплава Д16Т при нормальной и повышенных температурах // *Физика твердого тела.* 2008. Т. 50. Вып. 5. С. 805–810.
3. *Strand O.T., Berzins L.V., Goosman D.R., Kuhlrow W.W., Sargis P.D., Whitworth T.L.* Velocimetry using heterodyne techniques // 26th International Congress on High Speed Photography and Photonics, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (Spie). Ed. D.L. Paisley, S. Kleinfelder, D.R. Snyder and B.J. Thompson. 2005. Vol. 5580. Pp. 593–599. DOI:10.1117/12.567579
4. *Федоров А.В., Михайлов А.Л., Финюшин С.А., Калашиников Д.А., Чудаков Е.А., Бутусов Е.И., Гнутов И.С.* Регистрация параметров множественного откола и внутренней структуры облака частиц при ударно-волновом нагружении металлов // *Журнал экспериментальной и теоретической физики.* Том 149. Вып. 4. 2016. С. 792–795.
5. *McCall G.H., Bongian W.L., Miranda G.A.* Microwave interferometer for shock wave, detonation, and material motion measurements // *RSI.* 1985. Vol. 56. No. 8. Pp. 1612–1618.
6. *Канаков В.А., Лупов С.Ю., Орехов Ю.И., Родионов А.В.* Методы извлечения информации о перемещении границ раздела в газодинамических экспериментах с использованием радиointерферометров миллиметрового диапазона // *Изв. Вузов. Радиофизика.* 2008. Т. 51, № 3. С. 234–246.
7. *Канаков В.А., Лупов С.Ю., Пархачёв В.В., Родионов А.В.* Многомодовая радиointерферометрия как средство увеличения числа определяемых параметров ВВ // *Труды междунар. конф. «9 Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны».* 12–16 марта 2007. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2007. С. 665–670.
8. *Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А.* Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов // *Физика горения и взрыва.* 2011. № 6. С. 29–41.
9. *Chang A.L.* In-Situ Measurement of Penetrator Erosion Rate and Dynamic Flow Stress During Long-Rod Penetration // *ARL-TR-1187.* August 1996: Электронный ресурс. URL: <https://archive.org/details/DTC ADA317845/page/n5/mode/2up> (дата доступа 20.07.2021).
10. *Левин Б.Р.* Теоретические основы статистической радиотехники – кн. 2. М.: Советское радио, 1968. 504 с.
11. *Брагов А.М., Грушевский Г.М., Олонов Л.К.* Установка для исследования механических свойств

твердых тел при ударном нагружении // Заводская лаборатория. 1991. № 7. С. 50–51.

12. Брагов А.М., Грушевский Г.М., Ломунов А.К., Сергеев И.В., Прауд У. Исследование динамической сжимаемости сухого песка в диапазоне амплитуд нагрузок до нескольких гигапаскалей // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сборник. 2006. Вып. 68. С. 221–228.

13. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. М.: Физматгиз, 1965. 688 с.

Поступила 22 июля 2021 г.

14. Степанов Г.В. Откольное разрушение материалов плоскими упругопластическими волнами // Проблемы прочности. 1976. № 8. С. 66–69.

15. Златин Н.А., Пугачев Г.С., Мочалов С.М., Брагов А.М. Временная зависимость прочности металлов при долговечностях микросекундного диапазона // Физика твердого тела. 1975. Т. 17. № 9. С. 2599–2602.

English

VELOCITY MEASUREMENT OF FREE-FORM SURFACE FOR SHOCK-LOADED SPECIMEN USING A RADIO INTERFEROMETER

Vladimir Vasilievich Balandin — PhD, Leading Researcher, Laboratory of Dynamic Materials Testing, Research Institute for Mechanics, Lobachevsky State University.

E-mail: balandin@mech.unn.ru

Vladimir Vladimirovich Balandin — PhD, Senior Researcher, Laboratory of Dynamic Materials Testing, Research Institute for Mechanics, Lobachevsky State University.

E-mail: vladimir.balandin@mech.unn.ru

Vladimir Vladimirovich Parkhachev — PhD, Associate Professor, Department of Radio Engineering, Faculty of Radiophysics, Lobachevsky State University.

E-mail: vvp@rf.unn.ru

Address: 603950, Russian Federation, Nizhny Novgorod, Gaharina av., 23.

Abstract: Supporting and protective structures of various equipment may be affected by severe impacts of shock and explosive nature during operation. Structural materials are subjected to shock waves because of such impacts. That said, the interaction of loading and unloading waves caused by pressure wave reflection from free-form surfaces might result in spall fractures. Interferometric methods are widely used in research of spall strength for various metals and alloys to measure motion velocity of specimen free-form surface under impact of loading wave directed to the surface. VISAR and PDV interferometers operating in optical and near-infrared wavelength range are most often used in research. These interferometers have quite high requirements for reflecting surface quality. There are also cases when interferometer's probing beam is poorly reflected from free-form surface of the specimen under research or when the surface reflectivity is much degraded during the experiment. That said, power boosting of laser emission does not always result in acceptable outcome due to reducing of signal-to-noise ratio in the recorded interference signal. With regard to this, an interferometer operating in millimeter wavelength range is of great interest. This device has much lower requirements for reflecting surface quality (the roughness may be as high as tenths of a millimeter, and radio waves of millimeter range are reflected from the surface of any conductive body. These systems find use in detonation process investigation and they are also known to be used in ballistic experiment. Experiments on shock loading of aluminum alloy specimens were performed to test the technique efficiency. Velocity of specimen free-form surface was defined when a loading wave exited onto it using an interferometer. Spall strength of the material under study was determined after velocity profile of free-form surface. A good agreement was achieved when comparing the obtained results and the results of other authors received by using other methods. The conclusion is drawn about the possibility of using this technique to investigate spall strength in plane-wave experiments.

Keywords: radio interferometer, motion detection, velocity of specimen free-form surface, spall strength.

References

1. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface // J. Appl. Phys. 1972. DOI: 10.1063/1.1660986

2. Garkushin G.V., Razorenov S.V., Kanel G.I. Submicrosecond strength of aluminum alloy D16T at normal and elevated temperatures. Fizika tverdogo tela. 2008. Vol. 50. Iss. 5. Pp. 805–810.

3. *Strand O.T., Berzins L.V., Goosman D.R., Kuhlow W.W., Sargis P.D., Whitworth T.L.* Velocimetry using heterodyne techniques // 26th International Congress on High Speed Photography and Photonics, Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (Spie). Ed. D.L. Paisley, S. Kleinfelder, D.R. Snyder and B.J. Thompson. 2005. Vol. 5580. Pp. 593–599. DOI:10.1117/12.567579
4. *Fedorov A.V., Mikhailov A.L., Finyushin S.A., Kalashnikov D.A., Chudakov E.A., Butusov E.I., Gnutov I.S.* Registration of parameters of multiple breakaway and internal structure of a particle cloud under shock-wave loading of metals. *Zhurnal eksperimental'noj i teoreticheskoy fiziki*. Vol. 149. Iss. 4. Pp. 792–795.
5. *McCall G.H., Bongian W.L., Miranda G.A.* Microwave interferometer for shock wave, detonation, and material motion measurements // *RSI*. 1985. Vol. 56. Iss. 8. Pp. 1612–1618.
6. *Kanakov V.A., Lupov S.Yu., Orekhov Yu.I., Rodionov A.V.* Methods of extracting information about the change of interface boundaries in gas-dynamic experiments using radio interferometers of the millimeter range. *Izvestia Vuzov. Radiophysics*. 2008. Vol. 51. No. 3. Pp. 234–246.
7. *Kanakov V.A., Lupov S.Yu., Parkhachev V.V., Rodionov A.V.* Multimode radio interferometry as a means of increasing the number of determined parameters of explosives. Proceedings of the international conference "9 Kharitonov thematic scientific readings. Extreme states of matter. Detonation. Shock waves". March 12–16, 2007. Sarov: RFNC-VNIIEF. 2007. Pp. 665–670.
8. *Belsky V.M., Mikhailov A.L., Rodionov A.V., Sedov A.A.* Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes. *Fizika gorenija i vzryva*. 2011. No. 6. Pp. 29–41.
9. *Chang A.L.* In-Situ Measurement of Penetrator Erosion Rate and Dynamic Flow Stress During Long-Rod Penetration. ARL-TR-1187. August 1996: Electronic source. URL: https://archive.org/details/DTIC_ADA317845/page/n5/mode/2up (access date 21.07.2021).
10. *Levin B.R.* Theoretical foundations of statistical radio engineering – part. 2. Moscow: Sovetskoe radio, 1968. 504 p.
11. *Bragov A.M., Grushevsky G.M., Olonov L.K.* Installation for the study of mechanical properties of solid bodies under shock loading. *Zavodskaya lab*. 1991. No. 7. Pp. 50–51.
12. *Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K., Sergeichev I.V., Proud U.* Investigation of the dynamic compressibility of dry sand in the range of load amplitudes up to several gigapascals. *Problemy prochnosti i plastichnosti: Interuniversity collection*. 2006. Iss. 68. Pp. 221–228.
13. *Zeldovich Ya.B., Raiser Yu.P.* Physics of shock waves and high-temperature hydrodynamic phenomena. Moscow: Fizmatgiz, 1965. 688 p.
14. *Stepanov G.V.* Spall destruction of materials by flat elastic-plastic waves. *Problemy prochnosti*. 1976. No. 8. Pp. 66–69.
15. *Zlatin N.A., Pugachev G.S., Mochalov S.M., Bragov A.M.* The time dependence of the strength of metals at the durations of the microsecond range. *Semiconductors/physics of the solid state*. 1975. Vol. 17. No. 9. Pp. 2599–2602.