

УДК 531.39+621.37

ПРИМЕНЕНИЕ РАДИОИНТЕРФЕРОМЕТРА ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ СКОРОСТИ СВОБОДНОЙ ПОВЕРХНОСТИ В ПЛОСКОВОЛНОВОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ*

© 2018 г.

Баландин В.В.¹, Баландин Вл.Вл.¹,
Пархачёв В.В.², Ламзин Д.А.¹

¹Научно-исследовательский институт механики

Национального исследовательского Нижегородского государственного
университета им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

²Национальный исследовательский Нижегородский государственный
университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

balandin@mech.unn.ru

Поступила в редакцию 13.11.2017

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 таких методов требует хорошей подготовки поверхности исследуемого образца, поэтому большой интерес представляет интерферометр, работающий в миллиметровом диапазоне радиоволн, у которого требование к качеству отражающей поверхности значительно ниже. В статье 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 движения свободной поверхности образца при выходе на нее волны нагрузки. По профилю скорости свободной поверхности определялась откольная прочность исследуемого материала. Результаты исследования хорошо согласуются с экспериментальными результатами, полученными другими авторами с использованием иных методов. Предлагаемая методика может быть применена при изучении откольной прочности в плосковолновых экспериментах.

Ключевые слова: радиоинтерферометр, плосковолновой эксперимент, откольная прочность, регистрация перемещения, скорость свободной поверхности образца.

Введение

В процессе эксплуатации несущие и защитные конструкции в результате природных и техногенных катастроф, террористических актов могут испытывать интенсивные ударные и взрывные воздействия. В результате подобных воздействий кон-

* Выполнено при финансовой поддержке РФФ (проект №15-19-10032).

струкционные материалы подвергаются действию 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 интерферометры VISAR [1–6] и PDV [7–9], работающие в оптическом и ближнем инфракрасном диапазоне длин волн. Для работы этих интерферометров требуется достаточно высокое качество 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 мощности сигнала к мощности шума в регистрируемом сигнале интерференции.

В связи с этим большой интерес представляет интерферометр, работающий в миллиметровом диапазоне длин волн. У такого 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. Подобные системы нашли применение в исследованиях детонационных процессов [10–13], известно их применение в баллистическом эксперименте [14]. Понятно, что эти методы исследования динамических перемещений 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 настоящей статье описано применение радиоинтерферометра [11, 12] с длиной волны излучения 3,2 мм для измерения скорости свободной поверхности в плосковолновом эксперименте.

Постановка эксперимента

Интерферометр миллиметрового диапазона – устройство, предназначенное для измерения перемещений и скоростей физических объектов, которые способны отражать радиоволны миллиметрового диапазона, и реализующее схему Майкельсона в радиодиапазоне. Обобщенная структурная схема интерферометра представлена на рис. 1.

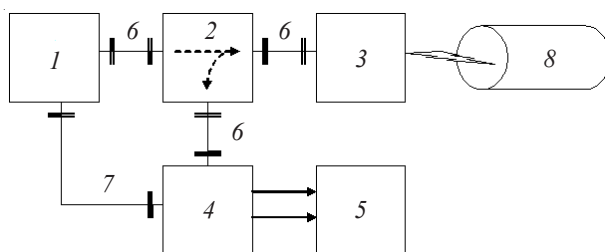


Рис. 1. Обобщенная структурная схема интерферометра

Интерферометр состоит из генератора электромагнитных колебаний миллиметрового диапазона 1, невзаимного развязывающего устройства (циркулятора) 2, антенны 3, приемного устройства 4 и блока регистрации и обработки данных (осциллографа) 5. Высокочастотные элементы схемы соединены волноводными трактами 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 непрерывные электромагнитные колебания постоянной мощности на фиксированной частоте через элементы волноводного тракта и развязывающее устройство поступают на антенну и излучаются в окружающую среду. Развязывающее устройство предназначено для того, чтобы сигнал с генератора попадал только в антенну и не проходил напрямую в тракт приемника, и в то же время оно препятствует прохождению принятого антенной сигнала в генератор и направляет этот сигнал в приемник. Если на пути излученных антенной интерферометра радиоволн появляется любое препятствие, происходит их отражение. Часть энергии отраженных от препятствия волн возвращается на антенну и через элементы волноводного тракта и развязывающее устройство поступает на вход приемного устройства. На другой вход приемного устройства через элементы волноводного тракта с генератора подается опорное колебание, частота которого однозначно связана с частотой излучаемой электромагнитной волны. В приемном устройстве происходит преобразование принятого с антенны 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 выполняется обработка в цифровой форме интерферограммы: вычисляется текущая фаза и частота. Результаты вычислений регистрируются как функции времени. При полной регистрации интерферограммы в процессе измерений ее обработка может выполняться после завершения эксперимента.

Текущая фаза и мгновенная частота интерферограммы соответственно несут информацию о перемещении и мгновенной скорости поверхности, от которой произошло отражение излучаемой интерферометром радиоволны, – исследуемого объекта. Связь параметров интерферограммы с параметрами движения исследуемого объекта обусловлена эффектом Доплера. Для поступательно движущейся отражающей поверхности эта связь может быть получена из уравнения для текущей фазы плоской отраженной 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; $x = x_0 + 2Vt$ – 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 определяется формулой

$$\Delta\varphi = \varphi_0 - 4\pi nV \frac{\Delta t}{\lambda},$$

где $\varphi_0 = \omega_0 \Delta t$ – приращение фазы опорного сигнала. Средняя на интервале Δt скорость объекта V запишется в виде:

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

где $\omega(t) = \Delta\varphi / \Delta t$ – мгновенная частота принимаемого сигнала, а разность частот $\Omega(t) = \omega(t) - \omega_0$ – 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 $\varphi(t) = \arctg(Q_s/Q_c)$ [15].

Наглядно принцип работы радионтерферометра проиллюстрирован на рис. 2.

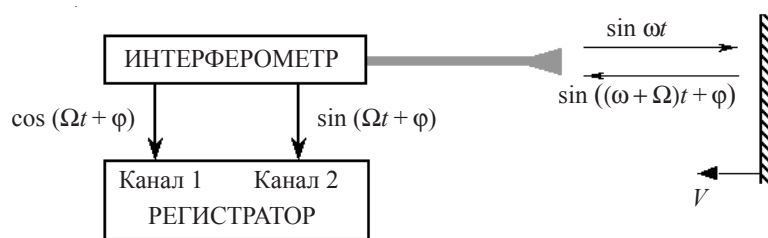


Рис. 2. Радионтерферометрический метод измерения

В эксперименте использовался интерферометр с длиной волны 3,2 мм. Рассмотрим схему подключения антенно-фидерной системы (АФС) радионтерферометра к экспериментальной сборке (рис. 3). Исследуемый образец (поверхность металлической пластины 1) облучается с помощью конического диэлектрического рупора 2 с шириной диаграммы направленности $\pm 15^\circ$. 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.

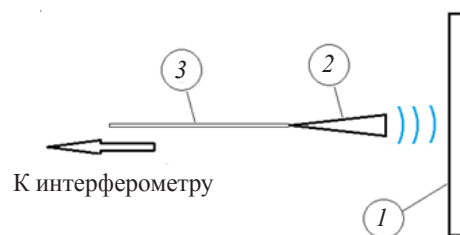


Рис. 3. Взаимное расположение АФС интерферометра и объекта исследования

Экспериментальные результаты

С целью проверки возможности применимости радионтерферометра для откольных исследований в плосковолновом ударном эксперименте была проведена серия из трех опытов. В каждом из опытов с помощью радионтерферометра измерялся профиль смещения свободной поверхности образца на временном интервале порядка 10 мкс. Затем путем численного дифференцирования строился профиль скорости свободной поверхности образца. Эксперименты проводились с образца-

ми из алюминиевого 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 [16, 17]. 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 [18], 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.

Таблица 1

№ эксперимента	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

Сигналы двух квадратурных каналов интерферометра регистрировались многоканальным цифровым осциллографом с частотой дискретизации 20 ГГц. Пример интерферограммы, зарегистрированной в эксперименте № 140, представлен на рис. 4.

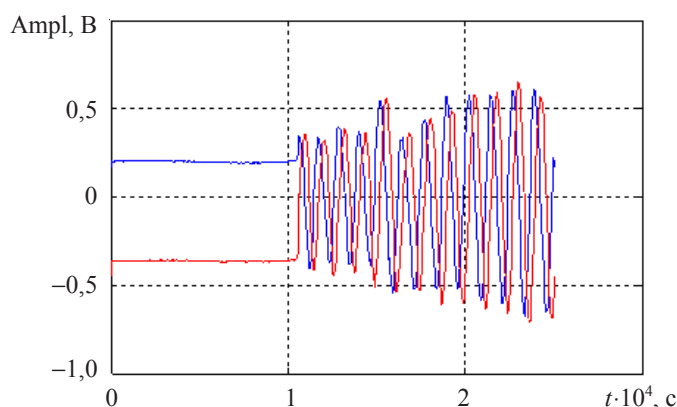


Рис. 4. Экспериментальная интерферограмма

Интерферометр регистрирует биения на временном интервале более 100 мкс. Каждое колебание на интерферограмме соответствует перемещению поверхности исследуемого образца на половину длины волны, то есть 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 и отличаются от измеренной скорости удара V_0 не более чем на 5%. Длительность импульсов на рис. 5 соответствует удвоенному вре-

мени 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 ~ 0,1–0,2 мм, определявшийся шероховатостью поверхности и наличием клея, то профиль скорости свободной поверхности для этого эксперимента имеет два максимума, разделенных 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, отраженной от зоны откольного разрушения. Как было отмечено в [3], откольное разрушение сплава Д16Т имеет затянутый характер: откольный импульс имеет очень плавное нарастание.

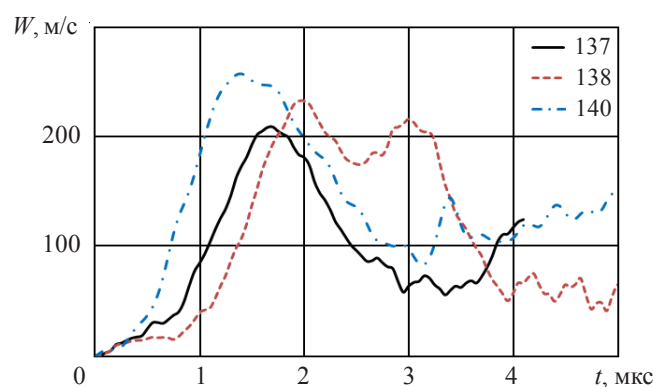


Рис. 5. Профили скорости свободной поверхности

В экспериментах также определялись максимальные растягивающие напряжения в образце [19]:

$$\sigma_p = 0,5\rho_0c_0(W_1 - W_2) + \delta,$$

где σ_p – максимальные растягивающие напряжения (при наличии откола σ_p соответствует откольной прочности), ρ_0 – плотность материала образца, c_0 – объемная 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 ее возрастанию, и поправка $\delta = 0$. Полученные скорости деформации W_1 и максимальные растягивающие напряжения σ_p для каждого опыта приведены в таблице. Следует отметить, что значения откольной прочности, полученные в данных экспериментах, близки к значениям, полученным другими авторами [3, 20].

Заключение

На основании проведенных 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%. Такое отличие может быть вызвано как влиянием волны разгрузки, следующей за волной сжатия и постепенно догоняющей ее, так и небольшим отклонением ударника от нормали при ударе.

Список литературы

1. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *Journal of Applied Physics*. 1972. No 43. P. 4669–4675.
2. Канель Г.И., Разоренов С.В. Аномалии температурных зависимостей объемной и сдвиговой прочности монокристаллов алюминия в субмикросекундном диапазоне. *Физика твердого тела*. 2001. Т. 43. Вып. 5. С. 839–845.
3. Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Канель Г.И. Субмикросекундная прочность алюминиевого сплава D16T при нормальной и повышенных температурах. *Физика твердого тела*. 2008. Т. 50. Вып. 5. С. 805–810.
4. Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортов В.Е. Исследование механических свойств материалов при ударно-волновом нагружении. *Механика твердого тела*. 1999. № 5. С. 173–188.
5. Канель Г.И., Разоренов С.В., Зарецкий Е.Б., Херман Б., Майер Л. Термическое «разупрочнение» и «упрочнение» титана и его сплава при высокой скорости ударно-волнового деформирования. *Физика твердого тела*. 2003. Т. 45. Вып. 4. С. 625–629.
6. Баландин В.В., Баландин Вл.Вл., Брагов А.М., Игумнов Л.А., Константинов А.Ю., Ломунов А.К. Высокоскоростное деформирование и разрушение стали 09Г2С. *Механика твердого тела*. 2014. №6. С. 87–94.
7. 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)*. 2005. Vol. 5580. P. 593–599. DOI:10.1117/12.567579.
8. Strand O.T., Goosman D.R., Martinez C., Whitworth T.L., Kuhlow W.W. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Review of Scientific Instruments*. 2006. Vol. 77. No 8. P. 083108.
9. Федоров А.В., Михайлов А.Л., Финюшин С.А., Калашников 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*. 2016. Т. 149. Вып. 4. С. 792–795.
10. McCall G.H., Bongian W.L., Miranda G.A. Microwave interferometer for shock wave, detonation and material motion measurements. *Review of Scientific Instruments*. 1985. Vol. 56. No 8. P. 1612–1618.
11. 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.
12. Канаков В.А., Лупов С.Ю., Пархачёв В.В., Родионов А.В. Многомодовая радиointерферометрия как средство увеличения числа определяемых параметров ВВ. *IX Харитоновские тематические научные чтения. Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны: Труды междунар. конф. 12–16 марта 2007 г. Саров. РФЯЦ–ВНИИЭФ*, 2007. С. 665–670.
13. Бельский В.М., Михайлов А.Л., Родионов А.В., Седов А.А. Микроволновая диагностика ударно-волновых и детонационных процессов. *Физика горения и взрыва*. 2011. Т. 47. №6. С. 29–41.
14. Chang A.L. *In-Situ Measurement of Penetrator Erosion Rate and Dynamic Flow Stress During Long-Rod Penetration*. ARL-TR-1187. August. 1996. 42 p.

15. Левин Б.Р. *Теоретические основы статистической радиотехники*. Кн. 2. М.: Советское радио, 1968. 504 с.
16. 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.
17. Брагов А.М., Грушевский Г.М., Ломунов А.К., Сергеичев И.В., Прауд У. Исследование динамической сжимаемости сухого песка в диапазоне амплитуд нагрузок до нескольких гигапаскалей. *Проблемы прочности и пластичности*. 2006. Вып. 68. С. 221–228.
18. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. *Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений*. М.: Физматгиз, 1965. 686 с.
19. Степанов Г.В. Откольное разрушение материалов плоскими упругопластическими волнами. *Проблемы прочности*. 1976. №8. С. 66–69.
20. 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.

References

1. Barker L.M., Hollenbach R.E. Laser interferometer for measuring high velocities of any reflecting surface. *Journal of Applied Physics*. 1972. No 43. P. 4669–4675.
2. Kanel G.I., Razorenov S.V. Anomalies in the temperature dependences of the bulk and shear strength of aluminum single crystals in the submicrosecond range. *Physics of the Solid State*. 2001. Vol. 43. No 5. P. 871–877.
3. Garkushin G.V., Razorenov S.V., Kanel G.I. Submicrosecond strength of the D16T aluminum alloy at room and elevated temperatures. *Physics of the Solid State*. 2008. Vol. 50. No 5. P. 839–843.
4. Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V., Fortov V.E. Issledovanie mekhanicheskikh svoystv materialov pri udarno-volnovom nagrujenii [Investigation of the mechanical properties of materials under shock-wave loading]. *Mekhanika tverdogo tela [Mechanics of Solids]*. 1999. No 5. P. 173–188 (In Russian).
5. Kanel G.I., Razorenov S.V., Zaretsky E.B., Herrman B., Meyer L. Thermal «softening» and «hardening» of titanium and its alloy at high strain rates of shock-wave deforming. *Physics of the Solid State*. 2003. V. 45. No 4. P. 856–861.
6. Balandin V.V., Balandin V.I., Braгов A.M., Igumnov L.A., Konstantinov A.Yu., Lomunov A.K. High-rate deformation and fracture of steel 09G2S. *Mechanics of Solids*. 2014. Vol. 49. No 6. P. 666–672.
7. 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)*. 2005. Vol. 5580. P. 593–599. DOI:10.1117/12.567579.
8. Strand O.T., Goosman D.R., Martinez C., Whitworth T.L., Kuhlow W.W. Compact system for high-speed velocimetry using heterodyne techniques. *Review of Scientific Instruments*. 2006. Vol. 77. No 8. P. 083108.
9. Fedorov A.V., Mikhailov A.L., Finyushin S.A., Kalashnikov D.A., Chudakov E.A., Butusov E.I., Gnutov I.S. Detection of the multiple spallation parameters and the internal structure of a particle cloud during shock-wave loading of a metal. *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2016. Vol. 122. Iss. 4. P. 685–688.
10. McCall G.H., Bongiann W.L., Miranda G.A. Microwave interferometer for shock wave, detonation and material motion measurements. *Review of Scientific Instruments*. 1985. Vol. 56. No 8. P. 1612–1618.
11. Kanakov V.A., Lupov S.Yu., Orekhov Yu.I., Rodionov A.V. Techniques for retrieval of the boundary displacement data in gas-dynamic experiments using millimeter-waveband radio interferometers. *Radiophysics and Quantum Electronics*. 2008. Vol. 51. No 3. P. 210–221.
12. Kanakov V.A., Lupov S.Yu., Parkhachev V.V., Rodionov A.V. Mnogomodovaya radiointerferometriya kak sredstvo uvelicheniya chisla opredelyaemykh parametrov vzyrvchatykh veshchestv [Multimode radiointerferometry as a means of increasing the number of determined parameters of explosives]. *IX Kharitonovskie tematicheskie nauchnye chteniya. Ekstremalnye*

sostoyaniya veshchestva. *Detonatsiya. Udarnye volny: Trudy mezhdunar. konf. [IX Kharitonov Thematic Scientific Readings. Extreme States of Matter. Detonation. Shock Wave: Proceedings of the International Conf.]*, March 12–16, 2007. Sarov. VNIIEF Publ. 2007. P. 665–670 (In Russian).

13. Bel'skii V.M., Mikhailov A.L., Rodionov A.V., Sedov A.A. Microwave diagnostics of shock-wave and detonation processes. *Combustion, Explosion and Shock Waves*. 2011. Vol. 47. No 6. P. 639–650.

14. Chang A.L. *In-Situ Measurement of Penetrator Erosion Rate and Dynamic Flow Stress During Long-rod Penetration*. ARL-TR-1187. August. 1996. 42 p.

15. Levin B.R. *Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Kn. 2 [The Theoretical Foundations of Statistical Radio Engineering. Book 2]*. Moscow. Sovetskoe radio Publ. 1968. 504 p. (In Russian).

16. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Olonov L.K. Ustanovka dlya issledovaniya mekhanicheskikh svoystv tverdykh tel pri udarnom nagruzenii [A device for investigation of mechanical properties of solids under shock loading]. *Zavodskaya laboratoriya [Industrial Laboratory]*. 1991. No 7. P. 50–51 (In Russian).

17. Bragov A.M., Grushevsky G.M., Lomunov A.K., Sergeyechev I.V., Proud W. Issledovanie dinamicheskoy szhimaemosti sukhogo peska v diapazone amplitud nagruzok do neskol'kikh gigapaskaley [Investigation of the dynamic compressibility of dry sand in the amplitude range of loads up to several GPA]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2006. Iss. 68. P. 221–228 (In Russian).

18. Zel'dovich Ya.B., Raizer Yu.P. *Physics of Shock Waves and High-temperature Hydrodynamic Phenomena*. N.Y. Academic Press Inc. 1967. 880 p.

19. Stepanov G.V. Otkolnoe razrushenie materialov ploskimi uprugoplasticheskimi volnami [Spall fracture of materials elastoplastic waves flat]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 1976. No 8. P. 66–69 (In Russian).

20. Zlatin N.A., Pugachev G.S., Mochalov S.M., Bragov A.M. Vremennaya zavisimost prochnosti metallov pri dolgovechnostyakh mikrosekundnogo diapazona [Time dependence of metals strength under longevity of microsecond range]. *Fizika tverdogo tela [Physics of the Solid State]*. 1975. Vol. 17. No 9. P. 2599–2602 (In Russian).

USING RADIO-INTERFEROMETRY FOR MEASURING FREE SURFACE VELOCITY IN PLANE-WAVE EXPERIMENTS

Balandin V.V.¹, Balandin V.I.¹, Parkhachev V.V.², Lamzin D.A.¹

¹*Research Institute of Mechanics University of Nizhni Novgorod,
Nizhni Novgorod, Russian Federation*

²*Lobachevsky State University of Nizhni Novgorod, Nizhni Novgorod, Russian Federation*

In studying spallation strength of various metals, free surface velocity profiles are mostly registered using the interferometry methods working in the visible and near infrared wavelength range. Use of such methods involves proper preparation of the surface of the studied specimen, thus making especially interesting interferometers working in the millimeter-range radio-waves. The article describes the functioning principle of the interferometer used for registering displacement and for determining free surface velocity of the specimen in plane-wave experiments. The efficiency of the methodology is tested, using experiments on impact loading of specimens of the D16T aluminum alloy. The interferometer was used for determining free surface velocity of the specimen when a loading wave reaches the free surface. Then, based on the free surface velocity, spallation strength of the material under study was determined. The obtained results are in good agreement with the results published by other authors and obtained using different methods. The present methodology is applicable for studying spallation strength in plane-wave experiments.

Keywords: radio-interferometer, plane-wave experiment, spallation strength, registration of displacement, free surface velocity of the specimen.