

УДК 621.9.048.7

Определение твердости и стойкости к истиранию стальных образцов ультравысокоскоростным методом*

М.И. Абашин, А.Л. Галиновский, Л.В. Судник

Существует возможность определения физико-механических характеристик поверхностного слоя материала путем оценки результатов воздействия на него высокоскоростной струи жидкости (ультравысокоскоростной струи). Однако в настоящее время практически отсутствуют теоретические и экспериментальные исследования, расширяющие научные представления и позволяющие полноценно использовать ультравысокоскоростную струю в качестве диагностического. В данном исследовании впервые выполнено математическое моделирование методом конечных элементов удара струи воды со скоростью 350 м/с о поверхность преграды из стали 37Х2НВМБР. Теоретические данные проверены экспериментально на образцах, имеющих различную термообработку. Также проведено испытание полученных образцов на сухое трение и выполнено сопоставление теоретических и экспериментальных результатов. Исследование показало, что между глубиной гидрокаверны, образовавшейся в результате ультравысокоскоростного воздействия, твердостью образца и уносом массы при сухом трении существует линейная зависимость с высокой степенью корреляции. Это позволяет говорить о возможности применения ультравысокоскоростной диагностики как альтернативного метода для ускоренного определения стойкости материала на истирание.

Результаты исследования могут быть полезны для ускоренного определения стойкости материала на истирание.

Ключевые слова: ультравысокоскоростная струя, твердость, сухое трение, математическое моделирование, диагностика.

Determination of hardness and wear resistance of steel samples by the ultrajet method

M.I. Abashin, A.L. Galinovskiy, L.V. Sudnik

The physical and mechanical properties of a material on the surface can be determined by exposing it to a high-speed liquid jet, that is, an ultrajet. However, there are still very few theoretical and experimental studies that expand the scientific understanding and make it possible to use ultrajets in diagnostics. In this study, a water jet impact on the surface of the 37H2NVMBR stainless steel barrier at a speed of 350 m/s is analyzed by the finite element method. Theoretical

*Исследования выполнены за счет средств гранта Президента РФ № 16.120.11.5069-МД и гранта РФФИ № 12-0833022-мол_a_вед.



АБАШИН
Михаил Иванович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

ABASHIN
Mikhail Ivanovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



ГАЛИНОВСКИЙ
Андрей Леонидович
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

GALINOVSKIY
Andrey Leonidovich
(Moscow, Russian Federation,
Bauman Moscow State
Technical University)



СУДНИК
Лариса Владимировна
(Научно-исследовательский
институт импульсных
процессов с опытным
производством)

SUDNIK
Larisa Vladimirovna
(Minsk, Republic of Belarus
Research Institute of Pulse
Processes with Pilot Production)

data are verified experimentally on samples under different heat treatment conditions. In addition, the samples are tested on dry friction and the theoretical data are compared with the experimental results. The study shows that there exists a linear dependence with a high degree of correlation between the depth of a hydrocavity formed by the ultrajet impact, hardness of the sample, and the mass loss due to dry friction. This makes it possible to use the ultrajet diagnosis as an alternative for the rapid determination of the abrasion resistance of a material.

Keywords: ultrajet, hardness, dry friction, mathematical modeling, diagnostics.

По результатам выполненного авторами системного анализа возможностей гидроструйных технологий [1] было сделано заключение, что существует потенциальная возможность получения технологической информации о параметрах состояния поверхностного слоя материалов и изделий путем воздействия на него высокоскоростной струи жидкости (ультраструи). Аналогичные результаты получены и при проведении исследований методом экспертного оценивания [2], где эксперты согласованно высказались за перспективность технологии ультраструйной диагностики и ее большой научно-технический и практический потенциал.

Таким образом, полученные аргументированные данные, демонстрирующие актуальность развития метода ультраструйной диагностики, позволили сформировать методический план проведения теоретических и экспериментальных исследований, включающих этапы конечно-элементного моделирования взаимодействия ультраструи с преградой. Для сопоставления расчетных и экспериментальных данных была проведена ультраструйная диагностика специально изготовленной партии образцов.

Целью исследований являлось установление связи физико-механических характеристик (твердости) поверхностного слоя материала объекта контроля с параметрами его гидроэрозионного разрушения высокоскоростной струей жидкости.

Моделирование процесса ультраструйной диагностики. В теоретической части работы ис-

следованы особенности удара ультраструи о поверхность твердого тела с использованием аппарата механики сплошной среды в двумерной осесимметричной постановке. Известны работы, в которых было проведено моделирование высокоскоростного течения струй, в том числе, абразивно-жидкостных [3—11], удара твердых частиц о поверхность тела [12], однако, не проводилось имитационное воздействие на материал с целью получения информации о его физико-механических свойствах.

Идеализированная расчетная схема рассматриваемого процесса показана на рис. 1. Для описания поведения взаимодействующих материалов принималась идеальная упругопластическая модель среды. Система уравнений, описывающая двумерное осесимметричное течение в переменных Эйлера, имеет классический вид [15, 16]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\rho v_r}{r} &= 0; \\ \rho \frac{dv_r}{dt} &= \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial D_{rz}}{\partial z} + \frac{2D_{rr} + D_{zz}}{r}; \\ \rho \frac{dv_z}{dt} &= \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial D_{rz}}{\partial r} + \frac{D_{rz}}{r}; \\ \rho \frac{de}{dt} &= \sigma_{rr} \dot{\epsilon}_{rr} + \sigma_{zz} \dot{\epsilon}_{zz} + \sigma_{\theta\theta} \dot{\epsilon}_{\theta\theta} + 2\sigma_{rz} \dot{\epsilon}_{rz}; \end{aligned}$$

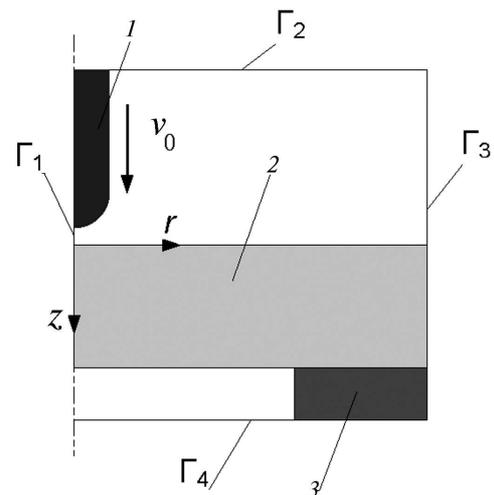


Рис. 1. Расчетная схема (постановка задачи):

1 — струя жидкости (воды), движущаяся со скоростью $v_0=350$ м/с [13, 14]; 2 — обрабатываемая мишень (преграда); 3 — опоры; $\Gamma_1-\Gamma_4$ — границы области моделирования

$$p = p(\rho, e); \sigma_{ij} = -pg_{ij} + D_{ij};$$

$$\dot{\varepsilon}_{rr} = \frac{\partial v_r}{\partial r}; \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r}; \dot{\varepsilon}_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}; \dot{\varepsilon}_{rz} = \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r};$$

$$\dot{\varepsilon}_{r\theta} = \dot{\varepsilon}_{z\theta} = 0;$$

$$\frac{DD_{rr}}{Dt} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{rr} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt}\right); \frac{DD_{zz}}{Dt} = 2G\left(\dot{\varepsilon}_{zz} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt}\right);$$

$$\frac{DD_{rz}}{Dt} = G(\dot{\varepsilon}_{rz});$$

$$f = 2\left(D_{rr}^2 + D_{rz}^2 + D_{zz}^2 + D_{rr}D_{zz}\right) \leq \frac{2}{3}Y^2.$$

Здесь ρ — плотность; p — давление; e — удельная внутренняя энергия; t — текущее время; r, z — радиальная и осевая координаты; v_r, v_z — компоненты вектора скорости; g_{ij} — метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат, причем $i, j = r, \theta, z$; $\sigma_{rr}, \sigma_{zz}, \sigma_{\theta\theta}$ — нормальные напряжения в радиальном, осевом и тангенциальном направлениях соответственно; σ_{rz} — касательные напряжения; D_{ij} — компоненты девиатора напряжений; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; $D(\dots)/Dt$ — производная Яуманна; G — модуль сдвига; Y — динамический предел текучести среды.

В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса и энергии, в общем виде уравнения состояния взаимодействующих сред, взаимосвязь компонентов тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими, кинематические соотношения, физические соотношения в виде закона Гука в дифференциальной форме и условия пластического течения Мизеса.

При решении исходной системы уравнений на неподвижной сетке область интегрирования ограничена: слева осью симметрии Γ_1 (см. рис. 1); сверху, справа, снизу — открытыми поверхностями (Γ_2 – Γ_4), через которые среда может вытекать или втекать.

Начальные условия конкретной задачи задавались распределением параметров ρ, p, v_r и v_z в поле течения. Компоненты напряжений принимаются равными нулю.

В качестве граничных условий принято, что в области контактного взаимодействия струи

с преградой накладывались ограничения на скорость индивидуальных точек в направлении оси OZ в соответствии с условиями непроницаемости материала, а также на напряженное состояние, реализующееся в этих точках в соответствии с третьим законом Ньютона [17].

Используя расчетную схему (см. рис. 1) и данные о физико-механических характеристиках материала преграды (табл. 1), было проведено численное моделирование удара струи о них, скорость струи выбрана равной 350 м/с, диаметр струи 0,2 мм, плотность воды 1 000 кг/м³, критерий разрушения — деформационный.

Таблица 1

Физико-механические характеристики преграды из стали 37Х2НВМБР

Характеристика	Обозначение	Значение
Плотность, г/см ³	ρ_0	7,5
Модуль сдвига, ГПа	G	80,8
Предел текучести, ГПа	Y	1,75
Откольная прочность, ГПа	σ_{p*}	1,65
Критическая интенсивность деформации	ε^*	0,80

В качестве допущения модели принимается отсутствие распыла струи, который происходит при взаимодействии с воздухом [18, 19]. Вокруг струи образуется водяная пелена, в которую постоянно переходит вода из струи. Толщина пелены весьма незначительна, так как ее внешний диаметр в несколько раз превышает диаметр самой струи и она легко разрушается на отдельные капли, которые уносятся потоком воздуха (в относительном движении). Принято говорить, что струя «обдирается» воздухом [20].

При проведении расчетов варьировался предел текучести материала, что соответствовало различным значениям твердости [21]. Результаты моделирования (рис. 2) показали, что с ростом предела текучести уменьшается глубина гидрокаверны, что полностью соответствует известным данным [22], согласно которым, с увеличением прочности повышается контактная стойкость и стойкость к индентированию. С целью подтверждения результатов математического моделирования была реализована серия экспериментов.

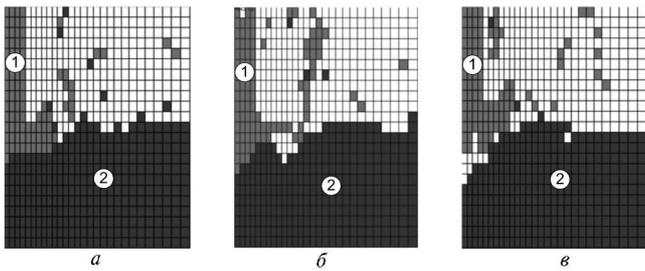


Рис. 2. Данные расчета в среде AutoDyn образцов из стали 37Х2НВМБР:

a — образец № 1, 54 HRC; *б* — образец № 2, 50,5 HRC; *в* — образец № 3, 43 HRC;
1 — струя воды; 2 — преграда

Экспериментальное исследование зависимости параметров гидроэрозионного разрушения от твердости исследуемого образца. Для проведения эксперимента были изготовлены три группы образцов по три штуки в каждой из материала 37Х2НВМБР, подвернутых различным режимам термообработки; твердость каждого образца измерялась не менее трех раз (табл. 2).

Таблица 2

Твердость образцов и режимы термообработки

Номер группы	Номер образца	Твердость HRC			Режимы термообработки
		1	2	3	
1	1	54	54	54	Закалка (950 °С 30 мин, охлаждение в воде); без отпуска
	2	58,5	58	58	
	3	56,5	56,8	56,5	
2	1	50,5	50,5	50,5	Закалка (950 °С 30 мин, охлаждение в воде); низкий отпуск (180 °С 2 ч, охлаждение на воздухе)
	2	53	53,8	53,8	
	3	53	53	53	
3	1	43	43	43	Закалка (950 °С 30 мин, охлаждение в воде); отпуск (540 °С 1 ч, охлаждение на воздухе)

С использованием установки для гидроабразивного резания фирмы FLOW (производства США) в Центре гидрофизических исследований МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством профессора Н.Н. Сысоева был осуществлен процесс ультразвуковой диагностики (УСД). На эмпирически подобранном технологическом режиме (скорость подачи 0,5 мм/с, давление на

выходе насосной станции высокого давления 380 МПа, диаметр ультразвуки 0,2 мм) осуществлялась диагностика образцов по схеме, представленной на рис. 3.

В результате ультразвукового воздействия на образцы на их поверхности образовались гидрокаверны, глубина которых была измерена с использованием профилографа-профилометра БВ-7669М «НИИ «Измерения» (табл. 3). Полученные результаты в графическом виде представлены на рис. 4.

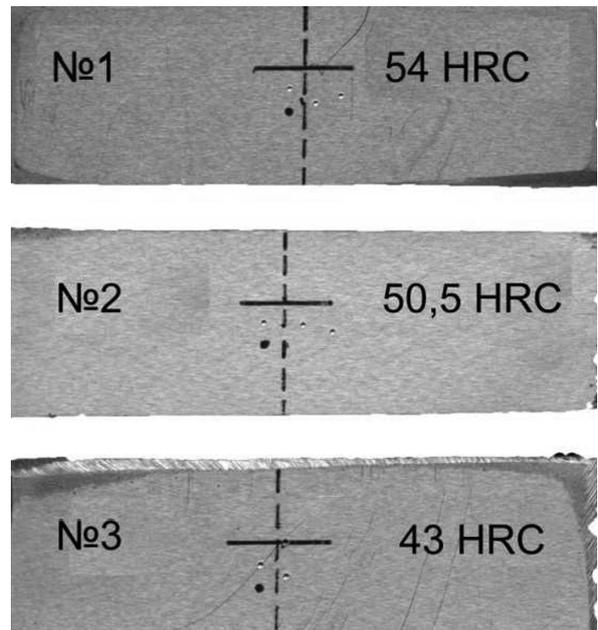


Рис. 3. Образцы перед проведением УСД:

- - - трасса, по которой осуществлялся процесс УСД; — — место ультразвукового индентирования

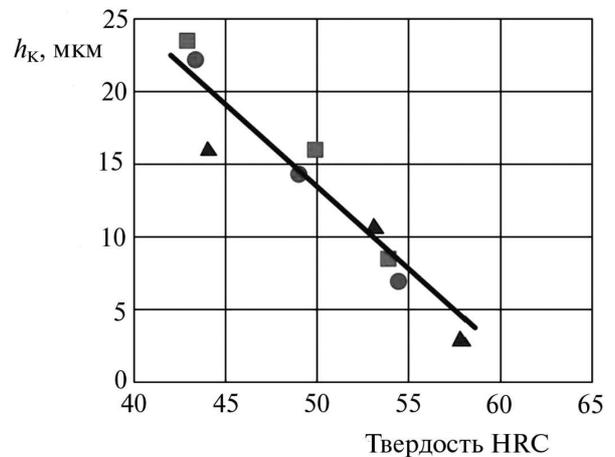


Рис. 4. Зависимость глубины образовавшейся гидрокаверны h_k от твердости образца:
▲ — группа № 1; ■ — группа № 2; ● — группа № 3

Таблица 3

Зависимость глубины гидрокаверны от твердости образцов

Номер группы	Номер образца	Твердость HRC	Глубина гидрокаверны, мкм
1	1	58,2	3,3
	2	53,5	10,4
	3	43,9	15,75
2	1	54	8,1
	2	50,5	16,5
	3	43	23,2
3	1	56,6	6,3
	2	50,5	15,1
	3	43,5	22,2

На рисунке 4 отчетливо видна характерная зависимость уменьшения глубины гидрокаверны от роста твердости. Возрастающая стойкость к индентированию препятствует развитию процессов продавливания металла и расклинивания трещин струей [23], что уменьшает скорость эрозии. Коэффициент ранговой корреляции по Спирмену составил 0,94.

Самостоятельный интерес представляют данные экспериментов, проведенные с теми же образцами (см. табл. 2) на машине трения. Для этого из исходных образцов (см. рис. 3) были изготовлены образцы, применяемые в машине трения, представленные на рис. 5.

Эксперименты проведены в РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина на кафедре «Трибология и технологии ремонта нефтегазового обо-



Рис. 5. Образцы для испытания на машине трения

рудования» под руководством профессора О.Ю. Елагинной. Целью экспериментов являлось определение значений уноса массы образцов в результате процесса истирания поверхности на машине трения, представляющей собой классический вид [24]. Первоначально производилась приработка в течение 3 мин с целью установления стационарного режима истирания. После чего осуществлялось взвешивание. Частота вращения диска $\omega = 400$ об/мин, что соответствует линейной скорости 10 м/с. Усилие P составляло 15 Н (рис. 6).

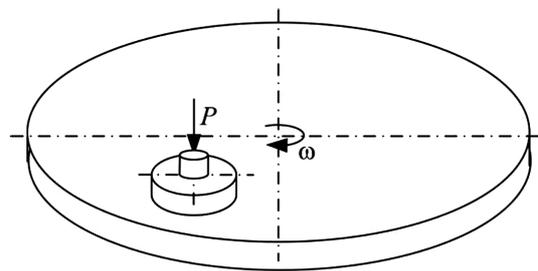


Рис. 6. Схема испытаний на трение

Результаты испытаний на трение представлены на рис. 7 и в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытаний образцов на машине трения

Номер образца	Масса образца, г			Унос массы, г		Глубина гидрокаверны, мкм
	до испытаний	после 3 мин работы	после 13 мин работы	после 3 мин работы	после 13 мин работы	
1	44,6709	44,5445	44,4318	89,2154	0,1127	3,30
2	48,2571	48,1601	48,0297	96,4172	0,1304	10,40
3	47,4316	47,3132	47,1695	94,7448	0,1437	15,75

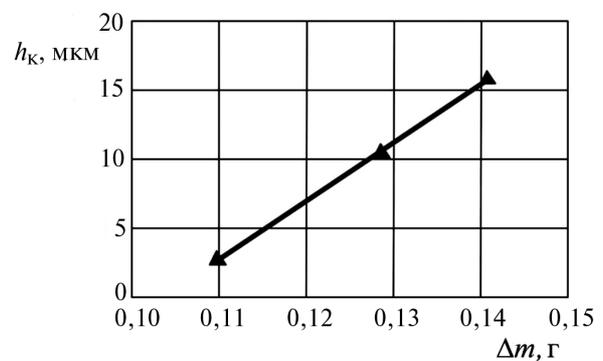


Рис. 7. Зависимость уноса массы при испытании на трение от глубины гидрокаверны, образовавшейся в результате УСД

Выводы

В результате проведенных исследований установлены корреляционные зависимости между глубиной образовавшейся после ультразвукового воздействия гидрокаверны и твердостью испытываемого материала, что также подтверждается результатами математического моделирования методом конечных элементов. Выявлена высокая корреляция между глубиной образовавшейся гидрокаверны и уносом массы при испытании на сухое трение металла о металл. Таким образом, можно говорить о возможности применения ультразвуковой диагностики для ускоренного определения стойкости материала на истирание.

Учитывая расширение парка гидротехнологического оборудования на предприятиях машиностроительной отрасли, открываются широкие перспективы практической реализации ультразвукового метода диагностики — возможность оценки параметров качества различных технологических покрытий на основе данных об их эрозии в результате воздействия ультразвука в сочетании с другой диагностической информацией, морфологическими исследованиями и др.

Литература

1. Абашии М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Ковалев А.А., Кучкин К.В., Сысов Н.Н. Физико-технический анализ информационно-диагностического потенциала ультразвуковых гидротехнологий. Препринт. М., 2010. 33 с. № 10/2010.
2. Галиновский А.Л., Абашии М.И., Проваторов А.С. Сравнительный анализ ультразвуковой диагностики параметров поверхностного слоя материала с другими видами диагностики методом экспертного оценивания/ Молодежь. Техника. Космос: Тр. IV Общероссийской молодежной науч.-техн. конф. Балт. гос. техн. ун-т. СПб., 2012. 11 с.
3. Babets K., Geskin E.S. Application of Fuzzy Logic for Modeling of Waterjet Depainting // *Machining Science and Technology*. 2000. Vol. 4. No. 1. P. 81—100.
4. Guha A. An experimental and numerical study of water jet cleaning process [Электронный ресурс] / A. Guha, R.M. Barron, R. Balachandar (<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1009/1009.0531.pdf>). Дата обращения 17.05.2013.
5. Numerical Simulation of High Speed Turbulent Water Jets in Air // *Journal of Hydraulic Research*. 2010. No. 48(1). P. 119—124.
6. Hashish M., duPlessis M.P. Theoretical and Experimental Investigation of Continuous Jet Penetration of Solid // *ASME Journal of Engineering for Industry*. 1978. No. 100. P. 88—94.
7. Leu M.C., Meng P., Geskin E.S., Tismeneskiy L. Mathematical Modeling and Experimental Verification of Stationary Water Jet Cleaning Process // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1998. No. 120(3). P. 571—579.

8. Rajaratnam N., Steffler P.M., Rizvi S.A.H., Smy P.R. Experimental Study of Very High Velocity Circular Water Jets in Air // *Journal of Hydraulic Research*. 1994. No. 32(3). P. 461—470.
9. Rajaratnam N., Albers C. Water Distribution in Very High Velocity Water Jets in Air // *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998. No. 124(6). P. 647—650.
10. Yoon S.S., Hewson J.C., Des Jardin P.E., Glaze D.J., Black A.R., Skaggs R.R. Numerical Modeling and Experimental Measurements of a High Speed Solid-Cone Water Spray for Use in Fire Suppression Applications // *International Journal of Multiphase Flow*. 2004. No. 30. P. 1369—1388.
11. Stepanov Y.S., Barsukov G.V., Alushin E.A. Modeling of Stress-strainstatus Target Material and Abrasive Particles Impact at Supersonic // *Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series mechanics, machine science, machine-building*. 2012. No. 2. P. 29—36.
12. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В., Михеев А.В. Математическое моделирование процессов сверхзвукового удара и проникания тел в металлургические преграды. Орел: Издательский дом «Орлик», 2012. 160 с.
13. Neusen K.F., Gores T.J., Labus T.J. Measurement of Particle and Drop Velocities in a Mixed Abrasive Water Jet Using a Forward-Scatter LDV System // *Proceedings of the 11-th International Conference on Jet Cutting Technology*, BHR Group. ST. Andrews. Scotland, Sept. 8—12. 1992. P. 63—73.
14. Balz R. Ultra-fast X-ray particle velocimetry measurements within an abrasive water jet [Электронный ресурс] / R. Balz, R. Mokso, C. Narayanan, D.A. Weiss, K.C. Heiniger (<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00348-013-1476-8>). Дата обращения 17.05.2013.
15. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 656 с.
16. Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстротечных процессов: В 3 т. Т. 3 / под ред. В.В. Селиванова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
17. Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Хафизов М.В., Муляр С.Г., Сайфудинов Р.Р. Формирование и ультразвуковая диагностика спеченного материала из наноразмерного порошка бемита // *Наноинженерия*. 2013. № 1. С. 26—31.
18. Атанов Г.А. Гидроимпульсные установки для разрушения горных пород. К.: Вища школа, 1987. 155 с.
19. Украинский Ю.Д. Фотографическое исследование струи гидропушки // *Известия высших учебных заведений СССР. Энергетика*. 1978. № 4. С. 143—146.
20. Атанов Г.А. Оценка эффективности гидропушки по пробиванию стальных пластин [Электронный ресурс] / Г.А. Атанов, Э.С. Гескин, А.В. Ковалев, О.А. Русанова, В. Самарджич, А.Н. Семко. (<http://ea.donntu.edu.ua/handle/123456789/6150>). Дата обращения 17.05.2013.
21. Бабкин А.В., Велданов В.А., Грязнов Е.Ф. Средства поражения и боеприпасы. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 984 с.
22. Феодосьев В.И. Сопrotивление материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 592 с.
23. Эрозия: Пер. с англ./Под ред. К. Прис. М.: Мир, 1982. 464 с.
24. Гриб В.В., Лазарев Г.Е. Лабораторные испытания материалов на трение и износ. М.: Наука, 1968. 141 с.

References

1. Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskii A.L., Kovalev A.A., Kuchkin K.V., Sysoev N.N. *Fiziko-tekhnicheskii analiz informatsionno-diaagnosticheskogo potentsiala ul'trastruinykh gidrotekhnologii* [Physical and technical analysis information diagnostic potential ultrastruinykh hydrotechnologies]. Preprint. Moscow, 2010, 33 p., no. 10/2010. (In Russian, unpublished).

2. Galinovskii A.L., Abashin M.I., Provatorov A.S. *Sravnitel'nyi analiz ul'trastruinoi diagnostiki parametrov poverkhnostno-gloia materiala s drugimi vidami diagnostiki metodom ekspertnogo otsenivaniia* [Comparative analysis ultrastruynoy diagnostic parameters of the surface layer of the material with other diagnosis by expert evaluation]. *Molodezh'. Tekhnika. Kosmos: Trudy 4 Obshcherossiiskoi molodezhnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii* [Youth. Technique. Space: Proceedings of the 4 All-Russian Youth Scientific Conference]. Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov publ., Saint Petersburg, 2012, 11 p.
3. Babets K., Geskin E.S. Application of Fuzzy Logic for Modeling of Waterjet Depainting. *Machining Science and Technology*. 2000, vol. 4, no. 1, pp. 81–100.
4. Guha A., Barron R.M., Balachandar R. *An experimental and numerical study of water jet cleaning process*. Available at: <http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1009/1009.0531.pdf> (accessed 17 May 2013).
5. Numerical Simulation of High Speed Turbulent Water Jets in Air. *Journal of Hydraulic Research*. 2010, no. 48(1), pp. 119–124.
6. Hashish M., duPlessis M.P. Theoretical and Experimental Investigation of Continuous Jet Penetration of Solid. *ASME Journal of Engineering for Industry*. 1978. No. 100. P. 88–94.
7. Leu M.C., Meng P., Geskin E.S., Tismeneskiy L. Mathematical Modeling and Experimental Verification of Stationary Water Jet Cleaning Process. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 1998, no. 120(3), pp. 571–579.
8. Rajaratnam N., Steffler P.M., Rizvi S.A.H., Smy P.R. Experimental Study of Very High Velocity Circular Water Jets in Air. *Journal of Hydraulic Research*. 1994, no. 32(3), pp. 461–470.
9. Rajaratnam N., Albers C. Water Distribution in Very High Velocity Water Jets in Air. *Journal of Hydraulic Engineering*. 1998, no. 124(6), pp. 647–650.
10. Yoon S.S., Hewson J.C., DesJardin P.E., Glaze D.J., Black A.R., Skaggs R.R. Numerical Modeling and Experimental Measurements of a High Speed Solid-Cone Water Spray for Use in Fire Suppression Applications. *International Journal of Multiphase Flow*. 2004, no. 30, pp. 1369–1388.
11. Stepanov Y.S., Barsukov G.V., Alushin E.A. Modeling of Stress-strainstatus Target Material and Abrasive Particles Impact at Supersonic. *Proceedings of State Engineering University of Armenia. Series mechanics, machine science, machine-building*. 2012, no. 2, pp. 29–36.
12. Stepanov Iu.S., Barsukov G.V., Mikheev A.V. *Matematicheskoe modelirovanie protsessov sverkhzyukovogo udara i pronikaniia tel v metallicheskie pregrady* [Mathematical modeling of supersonic shock and penetration of bodies in the metal barrier]. Orel, Izdatel'skii dom «Orlik» publ., 2012. 160 p.
13. Neusen K.F., Gores T.J., Labus T.J. Measurement of Particle and Drop Velocities in a Mixed Abrasive Water Jet Using a Forward-Scatter LDV System. *Proceedings of the 11-th International Conference on Jet Cutting Technology*. BHR Group, ST. Andrews. Scotland, Sept. 8–12. 1992, pp. 63–73.
14. Balz R., Mokso R., Narayanan C., Weiss D.A., Heiniger K.C. *Ultra-fast X-ray particle velocimetry measurements within an abrasive water jet*. Available at: (<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00348-013-1476-8>) (accessed 17 May 2013).
15. *Fizika vzryva* [Physics of Explosion]. Ed. L.P. Orlenko. In 2 vol. Vol. 2. Moscow, FIZMATLIT publ., 2004. 656 p.
16. Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., Selivanov V.V. *Chislennye metody v zadachakh fiziki bystroprotekaiushchikh protsessov* [Numerical methods in physics of fast processes]. In 3 vol. Vol. 3. Moscow, Bauman Press, 2006. 520 p.
17. Sudnik L.V., Galinovskii A.L., Kolpakov V.I., Khafizov M.V., Muliar S.G., Saifutdinov R.R. *Formirovanie i ul'trastruinaia diagnostika spechennogo materiala iz nanorazmernogo poroshka bemita* [Formation and ultra-jet diagnostics sintered powder of nanosized boehmite]. *Nanoinzheneriia* [Nanoengineering]. 2013, no. 1, pp. 26–31.
18. Atanov G.A. *Gidroimpul'snye ustanovki dlia razrusheniia gornykh porod* [Mud pulse systems for rock failure]. Kiev, Vishcha shkola publ., 1987. 155 p.
19. Ukrainskii Iu.D. *Fotograficheskoe issledovanie strui gidropushki* [Photographic study of the jet water cannon]. *Izvestiia vysshikh uchebnykh zavedenii SSSR. Energetika* [Proceedings of the higher educational institutions of the USSR. Energetics]. 1978, no. 4, pp. 143–146.
20. Atanov G.A., Geskin E.S., Kovalev A.V., Rusanova O.A., Samardzhich V., Semko A.N. *Osenka effektivnosti gidropushki po probivaniiu stal'nykh plastin* [Evaluation of Hydrocannon Based on the Piercing of Steel Plates]. Available at: <http://ea.donn-tu.edu.ua/handle/123456789/6150> (accessed 17 May 2013).
21. Babkin A.B., Veldanov V.A., Griaznov E.F. *Sredstva porazheniia i boeprirasy* [Munitions and Ammunition]. Moscow, Bauman Press, 2008. 984 p.
22. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of materials]. Moscow, Bauman Press, 2000. 592 p.
23. Eroziia [Erosion]. Ed. Pris K. Moscow, Mir publ., 1982. 464 p.
24. Grib V.V., Lazarev G.E. *Laboratornye ispytaniia materialov na trenie i iznos* [Laboratory testing of materials for friction and wear]. Moscow, Nauka publ., 1968. 141 p.

Статья поступила в редакцию 28.05.2013

Информация об авторах

АБАШИН Михаил Иванович (Москва) — ассистент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: texhelp@list.ru).

ГАЛИНОВСКИЙ Андрей Леонидович (Москва) — кандидат технических наук, доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1, e-mail: galcomputer@mail.ru).

СУДНИК Лариса Владимировна (Минск) — доктор технических наук, директор Научно-исследовательского института импульсных процессов с опытным производством (220005, Минск, Республика Беларусь, ул. Платонова, 12-Б-307, e-mail: impuls@bn.by).

Information about the authors

ABASHIN Mikhail Ivanovich (Moscow) — Assistant of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: texhelp@list.ru).

GALINOVSKIY Andrey Leonidovich (Moscow) — Cand. Sc. (Eng.), Dr. Sc. (Pedag.), Associate Professor, Professor of «Technology of Rocket-and-Space Engineering» Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, building 1, 2-nd Baumanskaya str., 5, 105005, Moscow, Russian Federation, e-mail: galcomputer@mail.ru).

SUDNIK Larisa Vladimirovna (Minsk) — Dr. Sc. (Eng.), Director of Research Institute of Pulse Processes with Pilot Production (Platonova st., 12b-307, 220005, Minsk, Republic of Belarus, e-mail: impuls@bn.by).