

Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи

© В.И. Колпаков, А.А. Илюхина

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассмотрены особенности математического моделирования технологий с использованием высокоскоростной гидроабразивной струи (для резки, прошивки, очистки, в том числе в условиях их подводного применения), а также особенности разрушения материалов, подвергаемых гидроабразивной обработке. На примере численного решения двумерной осесимметричной задачи прошивки отверстий гидроабразивной струей конструкций из различных материалов разработана физико-математическая модель данного процесса, базирующаяся на использовании предложенных в работе уравнений состояния гидроабразивной суспензии и критериальных зависимостей, описывающих закономерности разрушения обрабатываемого материала. Показаны особенности разрушения твердого материала при формировании в нем сквозного отверстия под действием высокоскоростной гидроабразивной струи. Приведены рекомендации по выбору кинематических параметров режущей струи для различных видов гидроабразивной / гидроструйной обработки.

Ключевые слова: гидроабразивная обработка, подводная резка, математическое моделирование, уравнение состояния

Введение. В настоящее время технологии гидроабразивной обработки находят широкое применение как в машиностроительных, так и в других отраслях промышленности [1–4]. Появляются новые возможности их использования, в частности, для решения прикладных задач освоения пространств мирового океана [5–7]. В этом плане представляет интерес развитие данных технологий в целях добычи полезных ископаемых с использованием высокоскоростной струи жидкости, обслуживания все возрастающего количества техногенно опасных объектов, например газопроводов, решения специальных задач по линии МЧС России.

Технология гидроабразивной резки (ГАР) реализует разделение элементов конструкций из различных материалов, включая их размерную обработку, например, под сварку. В связи со сложностью и высокой стоимостью проведения экспериментальных исследований, направленных на изучения этого процесса, а также вследствие разнообразия условий реализации подводной ГАР (различная глубина проведения работ и широкий спектр обрабатываемых материалов), существует необходимость развития методов математического моделирования данного процесса для его адаптации под конкретные условия работы.

Путем предварительного математического моделирования процесса можно оптимизировать параметры системы подачи гидроабразивной суспензии, в частности процентное содержание абразива в суспензии и давление в гидросистеме, и геометрические параметры струеформирующего тракта.

Цель настоящей работы — изучение влияния физико-механических и кинематических параметров режущей гидроабразивной струи на характер разрушения обрабатываемых материалов.

Методика расчета. Для решения поставленной задачи была разработана двумерная осесимметричная параметрическая схема (рис. 1). Задача решалась в среде программного комплекса ANSYS Autodyn в эйлеровой системе координат.

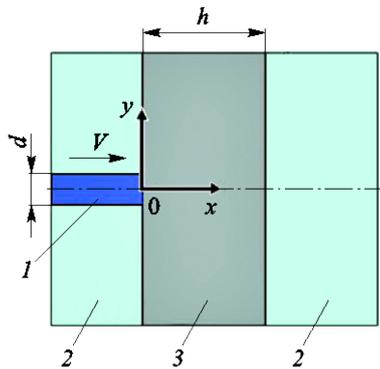


Рис. 1. Параметрическая схема процесса прошивки:
1 — суспензия; 2 — вода; 3 — преграда

Приведенная схема включает в себя струю гидроабразивной суспензии диаметром d , движущуюся со скоростью V под прямым углом к преграде. В качестве преграды в настоящей работе рассматривалась листовая конструкция из алюминиевого сплава толщиной $h = 4$ мм. В процессе исследования осуществлялось варьирование скоростью (V) и диаметром (d) гидроабразивной струи, плотностью суспензии (ρ_c), критическими условиями разрушения обрабатываемого материала (ϵ^*). При этом исследуемые параметры принимали следующие числовые значения: $d = 0,28 \dots 0,6$ мм; $V = 0,2 \dots 0,5$ км/с, $\rho_c = 1,00 \dots 1,15$ г/см³; $\epsilon^* = 0,01 \dots 0,001$ — критические значения предельной пластической деформации материала преграды, соответствующие процессу его разрушения. Рассматриваемый процесс можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i V^i &= 0; \quad \rho \frac{dV_i}{dt} = \nabla_i \sigma_j^i = 0; \quad \frac{dE}{dt} = \sigma_{ij} \epsilon^{ij}; \quad p = p(\rho, E); \\ \dot{\epsilon}_{ij} &= (\nabla_i V_j + \nabla_j V_i) / 2; \quad \sigma_{ij} = -p g_{ij} + D_{ij}; \\ D_{ij} D^{ij} &\leq 2Y^2 / 3; \quad \frac{dD_{ij}}{dt} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{ij} + \frac{1}{3} \frac{d\rho}{dt} g_{ij} \right); \quad \epsilon_i \geq \epsilon^*. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь ρ — плотность, г/см³; p — давление, ГПа; E — удельная внутренняя энергия, Дж/кг; t — текущее время, мкс; $i, j = x, \theta, y$ — координаты цилиндрической системы координат; V_i, V_j — компоненты вектора скорости; g_{ij} — метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат, причем $g_{ij} = 1$ при $i = j$ и $g_{ij} = 0$ в противном случае; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; D_{ij} — компоненты девиатора напряжений; $\dot{\epsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; G — модуль сдвига; Y — динамический предел текучести среды, ϵ_i — интенсивность деформаций.

В приведенной системе уравнений (1) в порядке следования представлены законы сохранения массы (уравнение неразрывности), импульса, энергии, уравнения состояния взаимодействующих сред в общем виде, кинематические соотношения, взаимосвязь компонент тензора напряжений с шаровой и девиаторной составляющими напряжений, физические соотношения в виде закона Гука в дифференциальной форме, условие пластического течения Мизеса и критерий деформационного разрушения среды.

Для описания разрушения элементов конструкции композиционного материала нами предложено использование критерия предельных пластических деформаций типа Смирнова — Аляева. При этом принималось, что при достижении уровня интенсивности деформаций в материале заготовки, превышающего критические значения, материал последней считается разрушенным, т. е. теряет свою прочность и ведет себя как сыпучее твердое тело. Таким образом, выбранный критерий позволяет имитировать влияние абразива на заготовку, не требуя введения в модель дополнительных элементов. С уменьшением числовых значений ϵ^* увеличиваются количество очагов разрушения и интенсивность трещинообразования, что соответствует возрастанию концентрации абразива в струе жидкости (рис. 2).

В качестве уравнения состояния гидроабразивной суспензии использовалось уравнение состояния

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \quad \text{при} \quad \mu = (\rho/\rho_0 - 1) \geq 0$$

и

$$p = T_1\mu + T_2\mu^2 + B_0\rho_0 e \quad \text{при} \quad \mu \leq 0,$$

где $A_1, A_2, A_3, B_0, B_1, T_1, T_2$ — коэффициенты, которые определялись расчетным путем с учетом массовой концентрации ~17...18 % абразива (частицы корунда плотностью 4 г/см³) в воде.

В этом случае перечисленные параметры принимали следующие значения:

$$A_1 = 13,176 \text{ ГПа}, A_2 = 9,074 \text{ ГПа}, A_3 = 13,86 \text{ ГПа};$$

$$B_0 = B_1 = 0,28;$$

$$T_1 = 2,2 \text{ ГПа}, T_2 = 0 \text{ ГПа}.$$

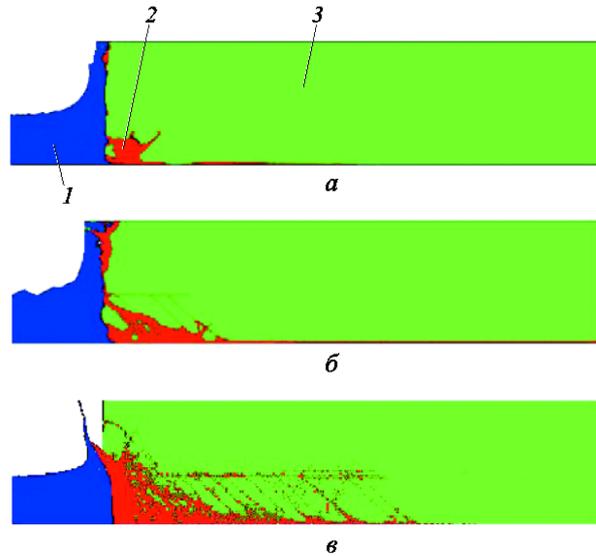


Рис. 2. Влияние критерия разрушения материала (ϵ^*) на характер трещинообразования в материале:
 а — $\epsilon^* = 0,03$; б — $\epsilon^* = 0,01$; в — $\epsilon^* = 0,001$;
 1 — режущая струя; 2 — разрушенный материал; 3 — прошиваемый металл

Кривые, характеризующие сжимаемость абразива (кривая 1), гидроабразивной суспензии (кривые 2) и воды (кривая 3) представлены на рис. 3.

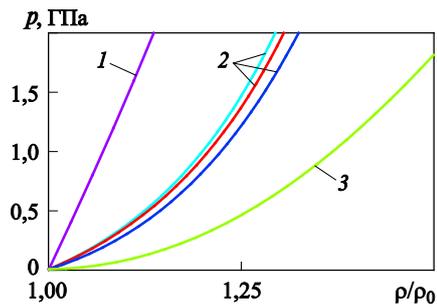


Рис. 3. Интерпретация уравнения состояния:
 1 — абразива, 2 — воды, 3 — гидроабразивной суспензии

Таким образом, благодаря введению критерия ϵ^* в уравнение состояния суспензии, а также учета в нем массовой концентрации абразива, модель гидроабразивной обработки значительно упрощается по сравнению с применяемыми ранее [8–10].

В качестве материала преграды (обрабатываемой детали) в проведенном исследовании принимался алюминиевый сплав АМг6, поведение которого хорошо описывается линейной баротропной зависимостью

$$p = K(\rho/\rho_{m0} - 1),$$

где $K = 60,5$ ГПа — модуль объемного сжатия; $\rho_{m0} = 2,64$ г/см³ — начальная плотность. Другие физико-механические параметры упругопластической модели для АМг6 принимались следующими: модуль сдвига $G = 26,3$ ГПа, динамический предел текучести $Y = 0,3$ ГПа.

В рамках принятой параметрической схемы (см. рис. 1) граничными условиями для рассматриваемой задачи являются:

- на контактных границах жидкость — материал заготовки соблюдаются равенства нормальных напряжений и условие непротекания

$$\sigma_{ij}^{(1)} n^j = p = \sigma_{ij}^{(2)} n^j \quad \text{и} \quad V_i^{(1)} n^i = V_i^{(2)} n^i;$$

- условие симметрии на оси $y = 0$ ($V_y = 0$, см. рис. 1);
- на свободных поверхностях $\sigma_n = 0$ или $p = 0$.

Обсуждение результатов. Исследование процесса разрушения при гидроабразивной прошивке в соответствии с расчетной схемой, приведенной на рис. 1, показало, что он может быть разделен на три этапа. На первом этапе разрушения происходит формирование сквозной трещины (рис. 4, а). На втором этапе режущая суспензия начинает проникать за преграду (рис. 4, б). На третьем этапе в обрабатываемом материале образуется отверстие, диаметр которого сравнивается с диаметром струи (рис. 4, в). Процесс прошивки можно считать завершенным уже на первом этапе, при осуществлении же резки необходимо руководствоваться временем завершения третьего этапа.

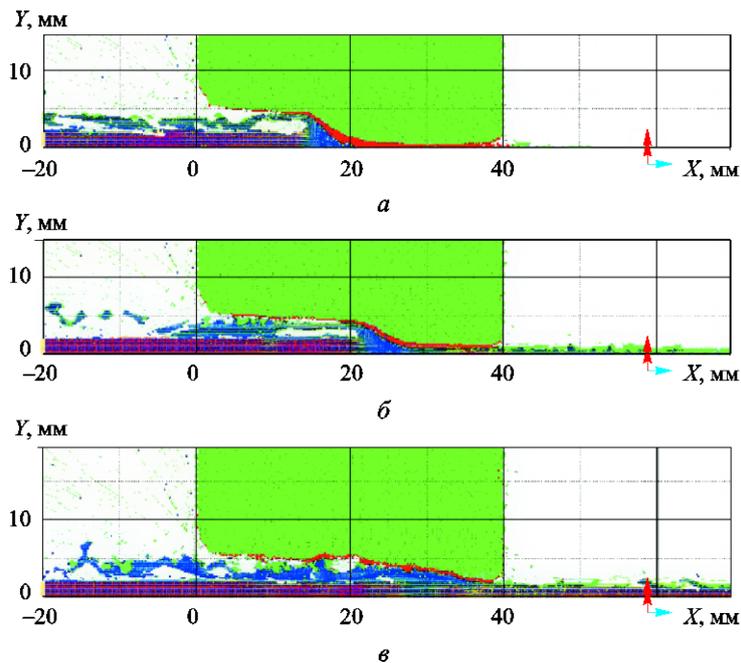


Рис. 4. Стадии развития процесса прошивки отверстия гидро- и гидроабразивной струей

В процессе расчетов определялась продолжительность каждого из этапов при различных числовых значениях параметров струи. Результаты выполненных расчетов представлены в таблице.

Продолжительность этапов разрушения обрабатываемого материала

Скорость струи V , км/с	Диаметр струи d , мм	Плотность струи ρ , г/см ³	Коэффициент разрушения ε	Время наступления состояния, мкс		
				Этап 1	Этап 2	Этап 3
0,2	0,4	1,15	0,01	1350	2550	2900
		1,00	0,01	2100	3450	3900
0,35	0,28	1,15	0,01	1120	1300	1550
		1,00	0,01	1400	1735	2000
	0,4	1,15	0,001	400	800	1000
		1,15	0,01	850	1400	1800
		1,00	0,01	1100	1850	2300
		1,15	0,01	600	1250	2100
0,6	1,00	0,01	750	1900	2600	
	1,15	0,01	620	1060	1250	
0,5	0,4	1,15	0,01	620	1060	1250
		1,00	0,01	740	1250	1600

На основании приведенных в таблице результатов можно заключить, что при увеличении скорости гидроабразивной струи уменьшается время обработки. Также его снижению способствует уменьшение предельных значений пластических деформаций в обрабатываемом материале, связанных в свою очередь с увеличением концентрации абразива в жидкости. Влияние же диаметра струи оказывается менее однозначным. Так, наступление первого этапа происходит тем быстрее, чем больше диаметр режущей струи. Наступление второго этапа практически не зависит от диаметра режущей струи. Третий этап наступает тем раньше, чем меньше диаметр режущей струи. Таким образом, параметры обработки (скорость и диаметр струи) должны выбираться исходя из поставленных задач. Например, для прошивки отверстий целесообразно применять сопла больших диаметров, а при резке — меньших.

Выводы. В результате проведенных исследований было выполнено следующее.

1. Разработана методика расчета процесса прошивки отверстий высокоскоростной абразивной струей, основанная на его численном моделировании в рамках механики сплошной среды, с использованием разработанной однокомпонентной математической модели гидроабразивной суспензии и модели эрозионного разрушения обрабатываемого материала.

2. Предложена модель эрозионного разрушения, основанная на идее повышения интенсивности трещинообразования в материале при воздействии на него высокоскоростной струи, которое, как пока-

зано в работе, можно описать критерием деформационного разрушения типа Смирнова — Аляема.

3. Показано, что процесс прошивки отверстий гидроабразивной струей может быть разделен на несколько стадий, а именно, формирование сквозной трещины, проникновение суспензии за тыльную поверхность обрабатываемой детали, формирование в преграде сквозного отверстия, диаметр которого приблизительно соответствует диаметру струи. При этом установлена взаимосвязь между эффективными параметрами струи гидроабразивной суспензии и видом обработки. В частности показано, что для прошивки отверстий предпочтительнее использовать струи большего диаметра, а для резки — меньшего.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Грищенко Т.А., Мелюхов Н.И., Любушкин В.О. Применение гидроабразивной резки при обработке деталей из полимерных композиционных материалов. *Вестник инженерной школы ДВФУ. Технические науки. Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов*, 2017, № 2 (31), с. 49–55.
- [2] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Моисеев В.А. Технико-экономическое обоснование выполнения контрольно-диагностических операций. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2015, № 1 (309), с. 133–139.
- [3] Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И., Муляр С.Г., Абашин М.И., Проваторов А.С. Модернизация технологии оценки эксплуатационных динамических свойств композиционной конструкционной керамики путем использования гидроабразивной ультраструи. *Наука и образование: научное издание МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 3, с. 15–23. DOI: 10.7463/0314.0701307
- [4] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В., Цаплин А.И., Проваторов А.С., Хафизов М.В. Моделирование ультраструйного воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89.
- [5] Wen Jiwei, Chen Chen, Campos Urso. *Experimental research on the performances of water jet devices and proposing the parameters of borehole hydraulic mining for oil shale*. DOI: 10.1371/journal.pone.0199027
- [6] Maslin E. *Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-high pressure*. URL: <https://www.oedigital.com/subsea/item/4249-subsea-waterjet-cutting-goes-ultra-deep-and-ultra-high-pressure> (дата обращения: 28.11.2018).
- [7] Underwater bridge repair, rehabilitation, and countermeasures. *Report No. FHWA-NHI-10-029*. Collins Engineers, Chicago, Illinois, 2010, 137 p.
- [8] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Хафизов М.В., Колпаков В.И. Повышение производительности гидроабразивной резки материалов путем выбора рациональных режимов обработки методом акустической эмиссии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2016, № 1 (670), с. 71–77. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-1-71-77
- [9] Герасимова А.М., Ефимова С.А., Прохорова А.В., Колпаков В.И. Особенности физико-математической постановки и численного решения типовых

задач гидроабразивной резки различных материалов. *Инженерный вестник: электронный научно-технический журнал МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 2014, № 1. URL: <http://engsi.ru/doc/671120.html>

- [10] Герасимова А.М., Галиновский А.Л., Колпаков В.И. Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2015, № 9 (666), с. 59–67. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-9-59-67

Статья поступила в редакцию 29.08.2019

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Колпаков В.И., Илюхина А.А. Особенности математического моделирования разрушения конструкций из разных материалов под действием высокоскоростной гидроабразивной струи. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2019, вып. 9. <http://dx.doi.org/10.18698/2308-6033-2019-9-1913>

Колпаков Владимир Иванович — д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
SPIN-код RSCI: 3108-5978, Scopus Author ID: 591104.
e-mail: kolpakov54@mail.ru

Илюхина Анна Андреевна — аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
SPIN-код RSCI: 3002-7087, Scopus Author ID: 997194. e-mail: ilanna_a@mail.ru

Features of mathematical modeling the destruction of structures of different materials under the high-speed waterjet

© V.I. Kolpakov, A.A. Ilukhina

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The article discusses the features of mathematical modeling of technologies using high-speed water jet (for cutting, piercing, cleaning, including their use in the underwater conditions), as well as features of material destruction under water jet treatment. The physical-mathematical model of the process based on the use of the proposed equations of hydroabrasive suspension state and criteria-based dependencies describing the regularities of the processed material destruction was developed on the example of numerical solving two-dimensional axisymmetric problem of piercing holes in the structures of various materials by hydroabrasive waterjet. The features of the solid material destruction during the formation of a through hole in it under the action of a high-speed water jet are shown. Recommendations on choosing kinematic parameters of the cutting jet for different types of waterjet/hydrodynamic machining are given.

Keywords: waterjet treatment, underwater cutting, mathematical modeling, characteristic equation

REFERENCES

- [1] Grishchenko T.A., Melukhov N.I., Lubushkin V.O. *Vestnik inzhenernoi shkoly DVFU. Tekhnicheskiye nauki. Proyektirovaniye, konstruktsiya i proizvodstvo letatelnykh apparatov — FEFU: School Of Engineering Bulletin (Technical science. Design, construction and production of aircraft)*, 2017, no. 2 (31), pp. 49–55.
- [2] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovsky A.L., Moiseev V.A. *Fundamentalnye i prikladniye problemy tekhniki i tekhnology — Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology*, 2015, no. 1, (309), pp. 133–139.
- [3] Sudnik L.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I., Mulyar S.G., Abashin M.I., Privatorov A.S. *Nauka i obrazovanie — Science and Education*, 2014, no. 3, pp. 15–23. DOI: 10.7463/0314.0701307
- [4] Abashin M.I., Galinovsky A.L., Bochkariov S.V., Tsaplin A.I., Provatorov A.S., Khafizov M.V. *Phizicheskaya mesomekhanika — Physical Mesomechanics*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89.
- [5] Wen Jiwei, Chen Chen, Campos Urso. *Experimental research on the performances of water jet devices and proposing the parameters of borehole hydraulic mining for oil shale*. DOI: 10.1371/journal.pone.0199027
- [6] Maslin E. *Subsea waterjet cutting goes ultra-deep and ultra-high pressure*. Available at: <https://www.oedigital.com/subsea/item/4249-subsea-waterjet-cutting-goes-ultra-deep-and-ultra-high-pressure> (accessed November 28, 2018).
- [7] Underwater bridge repair, rehabilitation, and countermeasures. *Report No. FHWA-NHI-10-029*. Chicago, Illinois, Collins Engineers Publ., 2010, 137 p.
- [8] Barzov A.A., Galinovsky A.L., Khafizov M.V., Kolpakov V.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2016, no. 1 (670), pp. 71–77. DOI: 10.18698/0536-1044-2016-1-71-77

- [9] Gerasimova A.M., Efimova S.A., Prokhorova A.V., Kolpakov V.I. *Inzhenernyy vestnik MGTU imeni N.E. Baumana — Engineering Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University*, 2014, no. 1. Available at: <http://engsi.ru/doc/671120.html>
- [10] Gerasimova A.M., Galinovsky A.L., Kolpakov V.I. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie — Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2015, no. 9 (666), pp. 59–67. DOI: 10.18698/0536-1044-2015-9-59-67

Kolpakov V.I., Dr. Sc. (Eng.), Professor, Department of Rocket and Spaceship Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. SPIN-code RSCI: 3108-5978, Scopus Author ID: 591104. e-mail: kolpakov54@mail.ru

Ilukhina A.A., post-graduate student, Department of Rocket and Spaceship Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University. SPIN-code RSCI: 3002-7087, Scopus Author ID: 997194. e-mail: ilanna_a@mail.ru