

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ГИДРО- И ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ

И.С. Бондарев

is-bondarev@mail.ru

SPIN-код: 9701-6171

А.А. Петров

aapetrov23@gmail.com

SPIN-код: 9375-6341

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Аннотация

Разработана физико-математическая модель процесса резания листового материала и представлены результаты параметрического исследования эффективности резания материала гидро- и гидроабразивной струей деталей из АМгб толщиной 10 мм в зависимости от ее скорости и массовой концентрации абразива, полученные с использованием программного комплекса ANSYS/AUTODYN. Установлено, что путем увеличения скорости струи без абразива до 1180 м/с можно повысить эффективность резания, оцениваемую временем прошивки материала, до значения, сравнимого с ее значением при обработке гидроабразивной струей при скорости 800 м/с и массовой концентрации гранатового песка 5 %, что приводит к увеличению ресурса струеформирующего тракта. Показано, что необходимого повышения скорости, реализуемого увеличением давления на входе установки, можно достичь с помощью современных насосов.

Ключевые слова

Гидроабразивная струя, гидроструя, прошивка, математическая модель гидроабразивной суспензии, критерии разрушения обрабатываемого материала, численное моделирование процесса, давление, скорость

Поступила в редакцию 22.01.2019

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2019

Введение. Гидрорезание является перспективной технологией, позволяющей осуществлять обработку различных материалов. Эффективность такого процесса резания напрямую зависит от давления, подаваемого на вход соплового блока установки. На начальном этапе развития технологии гидрорезания реализация высокого давления была ограничена возможностями насоса (до 400 МПа) [1]. Альтернативным способом повышения производительности обработки стало добавление в струю абразивных частиц. Пути внесения абразива в струю рассмотрены в работе [2]. Помимо положительного эффекта абразивные частицы добавили и отрицательные моменты: дополнительный износ соплового блока, усложнение конструкции установки, расходы на покупку абразива и его очистку.

В гидроабразивной установке одним из малоресурсных агрегатов является сопловой блок, в частности, смесительная головка, которая подвержена двум основным видам износа: эрозия потоком жидкости и истирание абразивными частицами. В работе [3] показано, что увеличение концентрации абразива в струе существенно увеличивает износ смесительной трубки.

С момента появления технологии гидрорезки развитие получили насосы высокого давления и технология герметизации соединений, что повысило скоростные возможности формируемой струи. Развитие технологий приводит к вопросу о том, можно ли отказаться от применения абразива для увеличения живучести соплового блока.

В работе были поставлены следующие вопросы: как будет отличаться скорость прошивки материала при гидроабразивном и гидровоздействии, при каких условиях производительность резки в двух рассматриваемых вариантах будет сопоставима?

Таким образом, целью настоящей работы является обоснование применения высокоскоростной гидрорезки без абразива. При этом в качестве метода исследования использовали численное моделирование процесса в рамках механики сплошной среды в среде программного комплекса ANSYS/AUTODYN.

Для достижения поставленной цели разработано математическое описание процесса, проведено параметрическое исследование прошивки материала, проанализировано влияние скорости струи и наличия абразива на эффективность резания.

Математическая модель. Расчет осуществлялся в программе ANSYS/AUTODYN. На рис. 1 представлена параметрическая модель процесса резания материала, в которой в качестве варьируемых параметров рассматривали физические характеристики сформированной струи: скорость истечения и ее абразивность.

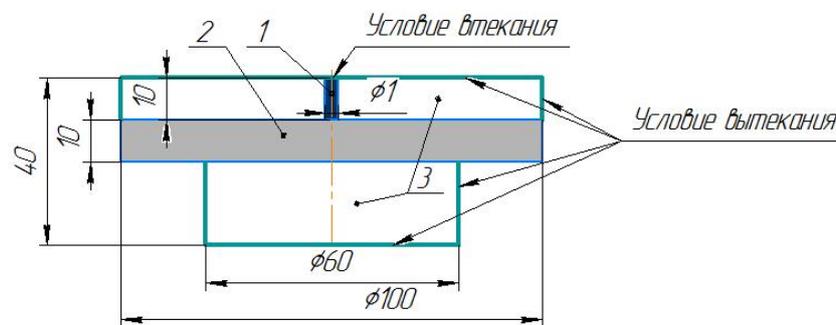


Рис. 1. Параметрическая модель процесса прошивки материала:

- 1 — рабочее тело (гидро- или гидроабразивная жидкость);
2 — обрабатываемый материал (сплав АМг6); 3 — воздух

При построении математической модели были приняты следующие допущения: гидроабразивная струя представляет собой суспензию, концентрация абразива в которой учитывается заданием ее плотности; трещинообразование из-за наличия абразива учитывается коррекцией предельной пластической деформации материала $\varepsilon_{пр}$. Составление математической модели базировалось на опыте работ в области математического моделирования гидро- и гидроабразивных процессов [4–6].

В программе ANSYS/AUTODYN процессы прошивки преграды гидро- и гидроабразивной жидкостью были описаны следующей системой уравнений [7–9]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v_i &= 0; \\ \rho \frac{dv_i}{dt} &= -\nabla_j \sigma_i^j; \\ \rho \frac{de}{dt} &= \sigma_{ij} \dot{\epsilon}^{ij}; \\ P &= P(\rho, e); \\ \frac{dD_{ij}}{dt} &= 2G \left(\dot{\epsilon}^{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} g_{ij} \right); \\ f &= D^{ij} D_{ij} < \frac{2}{3} Y^2; \\ \dot{\epsilon}^{ij} &= \frac{1}{2} (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i); \\ \epsilon_i &\geq \epsilon_{кр}. \end{aligned}$$

В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса, энергии, уравнение состояния взаимодействующих сред, закон Гука в дифференциальной форме, условие Мизеса, кинематические соотношения, критерий разрушения (Смирнова — Аляева), при этом использовались следующие обозначения: t — время; ρ — плотность; P — давление; e — удельная внутренняя энергия; i, j — осевая и радиальная координаты; v_i, v_j — компоненты вектора скорости; g_{ij} — метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат; σ_{ij} — напряжение; D_{ij} — компоненты девиатора напряжений; $\dot{\epsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; G — модуль сдвига; Y — динамический предел текучести среды.

В качестве уравнения состояния жидкости использовали полиномиальное соотношение вида:

$$P = A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e,$$

где A_1, A_2, A_3, B_0, B_1 — экспериментальные коэффициенты; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$.

Экспериментальные значения коэффициентов уравнения состояния представлены в табл. 1. В качестве граничных условий выбраны условие втекания на левой границе рабочего тела и условие вытекания по контуру воздушной среды (см. рис. 1).

В качестве уравнения состояния обрабатываемого материала применяли линейное соотношение вида

$$P = K \mu,$$

где $K = 60,5$ ГПа — модуль объемного сжатия АМгб; $\mu = \rho / \rho_0 - 1$.

Таблица 1

Экспериментальные коэффициенты полиномов

Материал	ρ , г/см ³	A_1 , ГПа	A_2 , ГПа	A_3 , ГПа	B_0	B_1
Вода	1,0000	2,2000	9,5400	14,570	0,28	0,28
Смесь воды и гранатового песка с массовой долей 5 %	1,0299	5,7656	9,3336	14,255	0,28	0,28
Смесь воды и гранатового песка с массовой долей 10 %	1,0616	9,5506	9,1145	13,920	0,28	0,28
Смесь воды и гранатового песка с массовой долей 20 %	1,1312	17,865	8,6332	13,185	0,28	0,28

Результаты математического моделирования. Результаты резания 10-мм листа из АМгб без применения абразива и с применением абразива различных концентраций. Скорость струи во всех случаях составляла 0,8 км/с представлены на рис. 2.

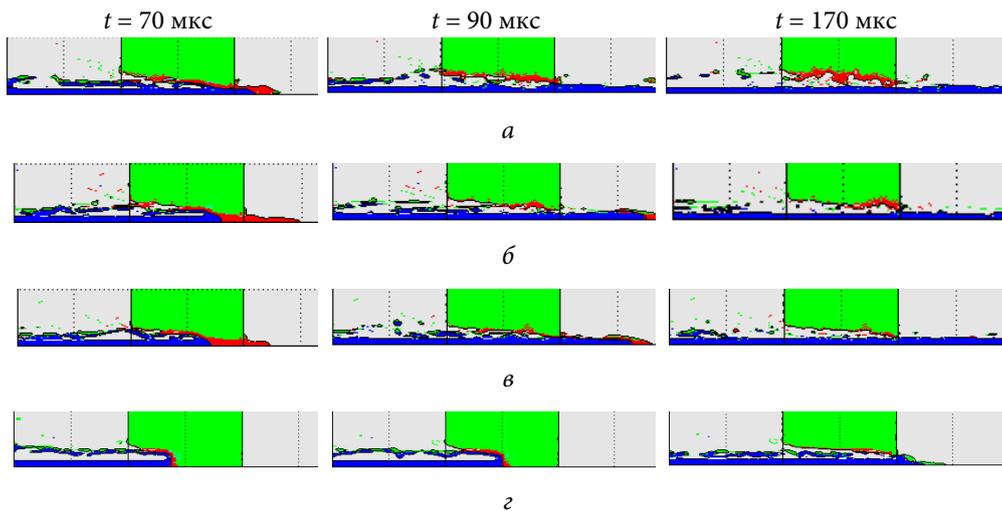


Рис. 2. Влияние массовой концентрации абразива (гранатовый песок) в струе на скорость прошивки обрабатываемого материала:

a — 20 %; *b* — 10 %; *v* — 5 %; *z* — без абразива

Таблица 2

Зависимость времени прошивки преграды от концентрации абразива в струе

Материал	Время прошивки преграды, мкс
Вода	170
Смесь воды и гранатового песка с массовой долей 5 %	80
Смесь воды и гранатового песка с массовой долей 10 %	75
Смесь воды и гранатового песка с массовой долей 20 %	70

Результаты зависимости времени прошивки материала от массовой концентрации абразива в струе представлены в табл. 2. Таким образом, скорость резания листа струей без абразива в 2,125 раза меньше, чем струей с концентрацией абразива 5 %. Очевидно, что для получения сопоставимых результатов скорости пробития материала гидро- и гидроабразивной струей необходимо увеличить скорость гидроструи. Результаты прошивки материала гидро- и гидроабразивной струей с близким значением времени прошивки представлены на рис. 3.

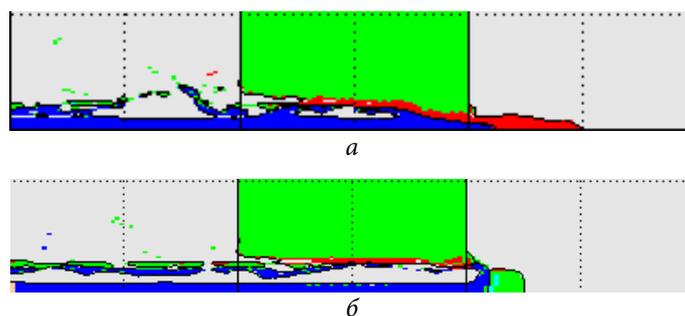


Рис. 3. Прошивка материала в момент времени $t = 80$ мкс при следующих параметрах струи:

a — массовая концентрация гранатового песка 5 %, $v = 0,8$ км/с; b — без абразива, $v = 1,18$ км/с

Повышения скорости формируемой струи можно добиться путем увеличения давления на входе в сопловой участок. Значение давления должно быть сопоставимо со значением, получаемым из соотношения [10]:

$$P = \frac{\rho v^2}{2} = \frac{1000 \cdot 1180^2}{2} = 6,962 \cdot 10^8 \text{ Па} = 696,2 \text{ МПа.}$$

Давление, определенное расчетным путем, способен реализовать насос фирмы MAXIMATOR GmbH [11] серии G500-2 (L)-771.

Выводы. В результате выполнения работы построены физико-математические модели поведения гидроабразивной суспензии при разной концентрации абразива в ней. Предложена модель разрушения обрабатываемого материала под действием гидро- и гидроабразивной струи.

Проведено параметрическое исследование эффективности воздействия гидро- и гидроабразивной струи при разных скоростях и уровне концентрации абразива в них. Показано, что эффективность воздействия гидроабразивного потока со скоростью 800 м/с и массовой концентрацией гранатового песка 5 % сравнима по времени с обработкой струей без абразива при скорости 1180 м/с. Полученное значение скорости достижимо при повышении давления в струеформирующем тракте путем использования насоса фирмы MAXIMATOR GmbH серии G500-2 (L)-771.

Литература

- [1] Абашин М.И., Саркисов П.И. Применение гидроабразивного резания для освобождения пострадавших в ДТП. *Наука и образование: научное издание*, 2011, № 8. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/224593.html>
- [2] Peres A. Abrasive suspension water jet cutting optimization using orthogonal array design. *Int. Conf. Manufacturing Engineering and Materials*, 2016, vol. 149, pp. 366–373. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.680 URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816311936>
- [3] Syazwani H., Mebrahitom G., Azmir A. A review on nozzle wear in abrasive water jet machining application. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 114, art. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/114/1/012020 URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/114/1/012020>
- [4] Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И. Факторная модель ультраструйной гидроэрозии. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2012, № 10, с. 63–68.
- [5] Герасимова А.М., Ефимова С.А., Прохорова А.М. и др. Особенности физико-математической постановки и численного решения типовых задач гидроабразивной резки различных материалов. *Инженерный вестник*, 2014, № 1. URL: <http://engsi.ru/doc/671120.html>
- [6] Тарасов В.А., Галиновский А.Л. Проблемы и перспективы развития гидроструйных технологий в ракетно-космической технике. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2013, № 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-636 URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html>
- [7] Орленко Л.П., ред. Физика взрыва. Т. 2. М., Физматлит, 2004.
- [8] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н. и др. Численные методы в задачах физики быстропотекающих процессов. Т. 3. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [9] Колпаков В.И. Математическое моделирование функционирования взрывных устройств. *Наука и образование: научное издание*, 2012, № 2. URL: <http://engineering-science.ru/doc/334177.html>
- [10] Abdel-Rahman A. A closed-form expression for an abrasive waterjet cutting model for ceramic materials. *Int. J. Math. Models Methods Appl. Sci.*, 2011, vol. 5, pp. 722–729.
- [11] ANSYS. URL: <http://www.ansys.com> (дата обращения: 12.11.2018).

Бондарев Иван Сергеевич — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Петров Андрей Александрович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Колпаков Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

COMPARATIVE ANALYSIS OF THE PRODUCTIVITY OF HYDRO AND HYDROABRASIVE FIRMWARE

I.S. Bondarev

is-bondarev@mail.ru

SPIN-code: 9701-6171

A.A. Petrov

aapetrov23@gmail.com

SPIN-code: 9375-6341

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

In the present paper, the authors developed a physic mathematical model of cutting sheet material and presented the results of a parametric study of the cutting material's efficient with a hydro and hydroabrasive jet of AMg6 parts with a thickness of 10 mm, depending on its speed and abrasive mass concentration that were obtained using the ANSYS/AUTODYN software package. The authors established that by increasing the speed of the jet without abrasive to 1180 m/s, it is possible to increase the cutting efficiency, estimated by the material flashing time, to a value comparable to its value during processing with a hydroabrasive jet at a speed of 800 m/s and a garnet sand mass concentration of 5%, which leads to an increase in the resource of the stream forming path. The paper is concerned that the necessary increase in speed, realized by increasing the pressure at the inlet of the installation, can be achieved with the help of modern pumps.

Keywords

Hydroabrasive jet, hydrostroke, flashing, mathematical model of hydroabrasive suspension, criteria for the destruction of the processed material, process numerical simulation, pressure, speed

Received 22.01.2019

© Bauman Moscow State Technical University, 2019

References

- [1] Abashin M.I., Sarkisov P.I. Application of hydroabrasive cutting for rescue of car accident injured. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2011, no. 8. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/224593.html> (in Russ.).
- [2] Perec A. Abrasive suspension water jet cutting optimization using orthogonal array design. *Int. Conf. Manufacturing Engineering and Materials*, 2016, vol. 149, pp. 366–373. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.06.680
URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816311936>
- [3] Syazwani H., Mebrahitom G., Azmir A. A review on nozzle wear in abrasive water jet machining application. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, 2016, vol. 114, art. 012020. DOI: 10.1088/1757-899X/114/1/012020
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/114/1/012020>
- [4] Barzov A.A., Galinovskiy A.L., Abashin M.I. Factor model of ultra-jet hydroerosion. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building], 2012, no. 10, pp. 63–68 (in Russ.).
- [5] Gerasimova A.M., Efimova S.A., Prokhorova A.M., et al. Special aspects of physical-mathematical setting up and numerical solving the routine problems of waterjet material

-
- cutting. *Inzhenernyy vestnik* [Engineering Bulletin], 2014, no. 1.
URL: <http://engsi.ru/doc/671120.html> (in Russ.).
- [6] Tarasov V.A., Galinovskiy A.L. Problems and prospects of ultra-jet technology in rocket space engineering. *Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii* [Engineering Journal: Science and Innovation], 2013, no. 3. DOI: 10.18698/2308-6033-2013-3-636
URL: <http://engjournal.ru/catalog/machin/rocket/636.html> (in Russ.).
- [7] Orlenko L.P., ed. Fizika vzryva. T. 2 [Explosion physics. Vol. 2]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2004 (in Russ.).
- [8] Babkin A.V., Kolpakov V.I., Okhitin V.N., et al. Chislennyye metody v zadachakh fiziki bystroprotekayushchikh protsessov. T. 3 [Numerical methods in problems of high-speed process physics. Vol. 3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006 (in Russ.).
- [9] Kolpakov V.I. Mathematical simulation of the explosive devices' performance. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie* [Science and Education: Scientific Publication], 2012, no. 2. URL: <http://engineering-science.ru/doc/334177.html> (in Russ.).
- [10] Abdel-Rahman A. A closed-form expression for an abrasive waterjet cutting model for ceramic materials. *Int. J. Math. Models Methods Appl. Sci.*, 2011, vol. 5, pp. 722–729.
- [11] ANSYS. URL: <http://www.ansys.com> (accessed: 12.11.2018).

Bondarev I.S. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Petrov A.A. — Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — V.I. Kolpakov, Dr. Sc. (Eng), Professor, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.