

ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ В УСЛОВИЯХ РАБОТЫ ПОД ВОДОЙ

М.А. Михайлова

mary.mihailowa1998@yandex.ru

SPIN-код: 3720-6607

А.В. Смирнов

a.v.smirnov98@gmail.com

SPIN-код: 3988-4510

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

Аннотация

Рассмотрены возможности повышения производительности мобильных установок, в частности, в рорезка, гидроабразивная про- условия работы под водой (для прошивки, резки, шивка, фокусирующее сопло, ма- очистки металлических изделий и т. п.). Предложе- тематическое моделирование, на математическая и параметрическая модель ANSYS / Autodyn, физико-мате- решения задачи в двумерной постановке при обра- матическая модель ботке деталей двухфазной суспензией. В результате численного моделирования в программной среде ANSYS / Autodyn проанализировано влияние структуры и концентрации абразивных частиц суспензии на эффективность воздействия формируемой высо- скоростной струи. Представленное решение позво- ляет не только увеличить срок службы фокусиру- ющей трубки, но и повысить производительность гидроабразивной обработки. Приведены рекоменда- ции по способу переключения режимов подачи абра- зива в струеформирующий тракт.

Ключевые слова

Гидроабразивная обработка, гид- рорезка, гидроабразивная про- тематическое моделирование, ANSYS / Autodyn, физико-мате- матическая модель

Поступила в редакцию 06.12.2021

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2021

Введение. Одним из наиболее перспективных способов обработки материалов на данный момент является технология гидроабразивного резания (ГАР). Эта технология находит широкое применение в разных отраслях промышленности: самолетостроение, ракетостроение, судостроение и т. д. [1–4].

В настоящее время крупногабаритные классические установки для ГАР вытесняются мобильными, более функциональными, которые благодаря своим сравнительно небольшим габаритным размерам могут использоваться для решения самых разных задач. На сегодняшний день известен эффект засорения струеформирующей головки вследствие заполнения ее частицами абразива, что приводит к постепенному засорению канала, снижению производительности установки и в итоге к потере работоспособности головки. На рис. 1 представлен разрез фокусирующего сопла — новое (до начала эксплуатации) и с наработкой порядка 50 ч, а также абразив, который необходимо удалять. Несвоевременна прочистка канала значительно уменьшает срок службы трубки [5].

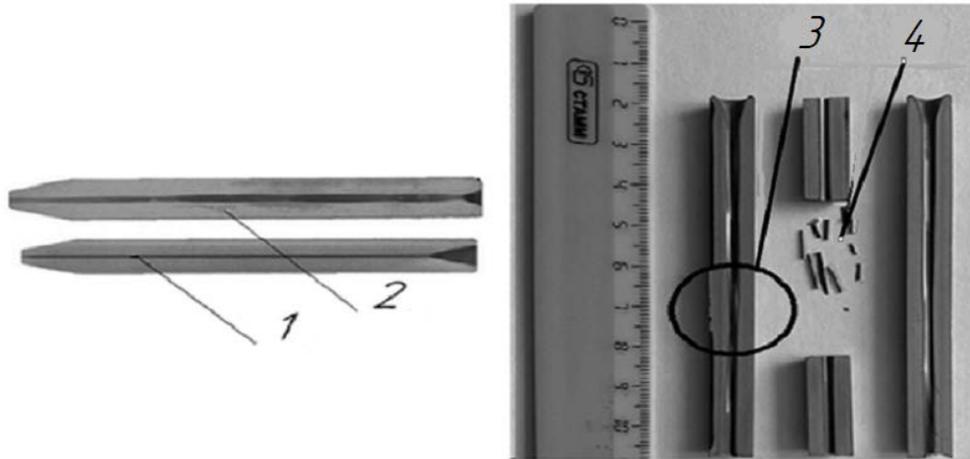


Рис. 1. Струеформирующий тракт в разрезе:

1 — тракт без наработки; 2 — тракт после 50 ч наработки;
3 — испорченная зона струеформирующего тракта; 4 — забившийся абразив

Цель данной работы — предложить метод предупреждения эффекта засорения струеформирующего тракта за счет дозированной подачи абразива в зону обработки с определенной частотой переключения режима операции: «вода», «вода + абразив». В ходе данной работы решали следующие задачи:

- разработка модели параметрической схемы гидроабразивного резания двухфазной суспензией;
- математическое моделирование процесса методом Эйлера — Лагранжа;
- определение теоретической частоты переключения между режимами.

Методика расчета. Для решения поставленной задачи была разработана двумерная осесимметричная параметрическая схема (рис. 2). Задачу решали в среде программного комплекса ANSYS / Autodyn методом Эйлера [6, 7].

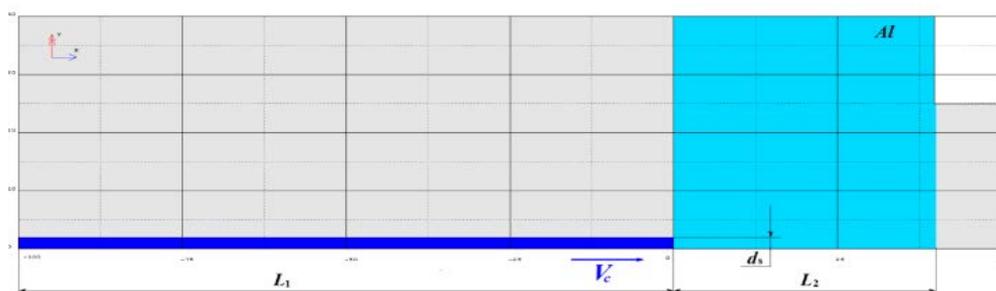


Рис. 2. Параметрическая модель процесса прошивки в системе координат OXY

Приведенная схема включает в себя струю гидроабразивной воды диаметром d_s , движущуюся со скоростью V_c под прямым углом к преграде. В качестве преграды в настоящей работе рассматривали листовую конструкцию из алюминиевого сплава (АМг6) толщиной $L_2 = 40$ мм. В процессе исследования варьировали число ударов о стенки преграды в микросекунду. Параметры трех вариантов схе-

мы $d_s = 4$ мм, $d_a = 3,6$ мм, $V_c = 0,3$ км/с, $f_{c1} = 40$ мкс⁻¹, $f_{c2} = 20$ мкс⁻¹, $f_{c3} = 10$ мкс⁻¹. Характеристики материалов преграды и абразива приведены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические характеристики преграды и абразива

Материал	Плотность ρ_0 , г/см ³	Модуль объемного сжатия K , ГПа	Модуль сдвига G , ГПа	Динамический предел текучести Y , ГПа	Коэффициент влияния критерия разрушения материала ε^*
АМгб	2,64	60,5	26,3	0,3	0,001
Абразив	4,1	156,39	121,9	8	—

Схемы, использованные для моделирования при различной частоте f_c соударений абразива о преграду, представлены на рис. 3.

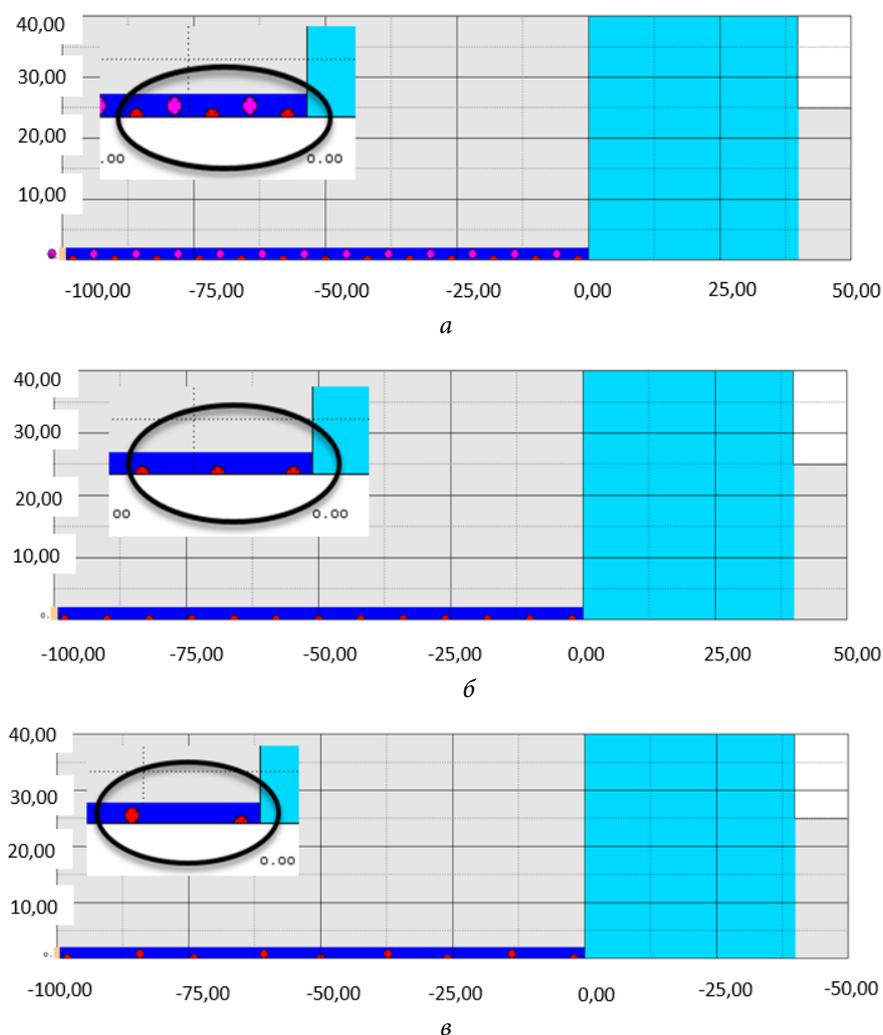


Рис. 3. Схемы, использованные при моделировании, в зависимости от частоты соударения частиц абразива о преграду:

a — $f_{c1} = 40$ мкс⁻¹; b — $f_{c2} = 20$ мкс⁻¹; v — $f_{c3} = 10$ мкс⁻¹

Схема 1 представляет собой модель для расчета прошивки мобильной устан­новки, где число соударений абразива о поверхности обрабатываемого материала составляет порядка 30...40 млн ударов в секунду. Схемы 2 и 3 соответствуют теоретически возможным моделям прошивки, где число ударов о поверхность материала равно соответственно 20 и 10 млн.

Рассматриваемые процессы можно описать следующей системой уравне­ний [7, 8]:

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

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, $g_{ij} = 1$ при $i = j$ и $g_{ij} = 0$ в противном случае; σ_{ij} — компоненты тензора напряжений; D_{ij} — компоненты девиатора напряжений; $\dot{\varepsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций; G — модуль сдвига; Y — динамический предел текучести среды, ε_i — интенсивность деформаций.

В системе уравнений (*) представлены законы сохранения массы, импульса, энергии, уравнение 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.

Для описания разрушения элементов конструкции композиционного материала было предложено использовать критерий Смирнова — Аляева (критерий сопротивления материалов пластическому деформированию). При этом принимали, что при достижении уровня интенсивности деформации в материале заготовки, превышающего критические значения, материал последней считается разрушенным, т. е. ведет себя как сыпучее твердое тело [9]:

$$\varepsilon_i \geq \varepsilon^*.$$

В качестве уравнения состояния гидроабразивной суспензии использовали уравнение состояния:

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

и

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

Здесь ρ_0 , ρ и μ — начальная, текущие плотность и сжимаемость воды соответственно; $A_1 = 2,2$ ГПа, $A_2 = 9,54$ ГПа, $A_3 = 14,57$ ГПа, $B_0 = B_1 = 0,28$, $T_1 = 2,2$ ГПа, $T_2 = 0$ ГПа — эмпирические коэффициенты.

В качестве материала преграды в проведенном исследовании был выбран алюминиевый сплав АМг6, поведение которого можно описать линейной баротропной зависимостью [8]:

$$p = K(\rho / \rho_0 - 1) .$$

Здесь $K = 60,5$ ГПа — модуль объемного сжатия; $\rho_0 = 2,64$ г/см³ — начальная плотность. Другие физико-механические параметры упругопластической модели для АМг6 принимали следующими: модуль сдвига $G = 26,3$ ГПа, динамический предел текучести $Y = 0,3$ ГПа.

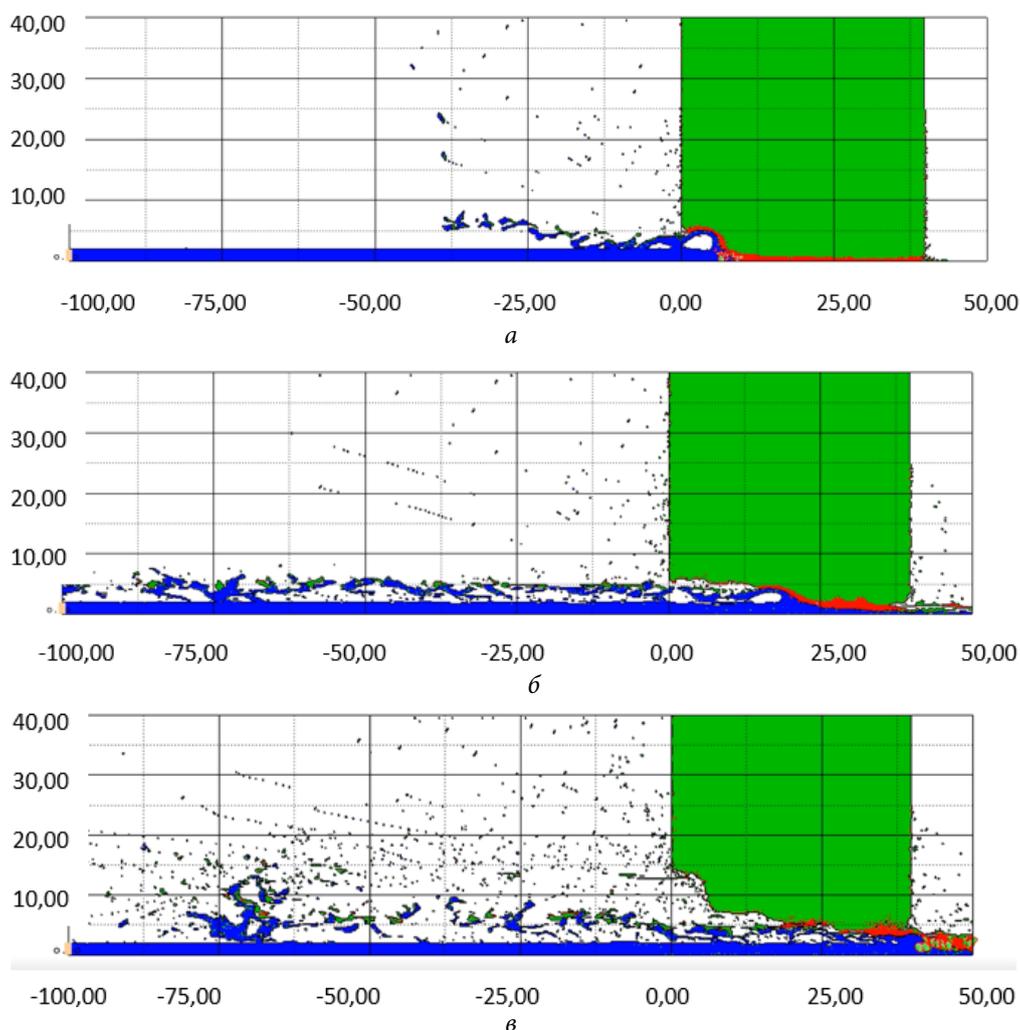


Рис. 4. Стадии развития процесса моделирования процесса гидроабразивной прошивки

В рамках выбранной параметрической модели приняты следующие граничные условия [11]:

- на контактных границах жидкость — материал заготовки соблюдаются равенства нормальных напряжений и условие непротекания;
- схема симметрична относительно оси y .

Полученные результаты. Исследование процесса прошивки в соответствии с приведенными на рис. 3 схемами было разделено на три стадии:

- 1) формирование сквозной трещины (рис. 4, *a*);
- 2) начало процесса образования отверстия (рис. 4, *b*);
- 3) свободное вытекание суспензии через образованное отверстие (рис. 4, *в*).

Результаты математического моделирования для каждой схемы представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты моделирования режимов по продолжительности стадии

Номер схемы	Время обработки, мкс		
	T_1	T_2	T_3
1	500	2000	2280
2	580	1380	2000
3	500	1360	1500

На основе полученных данных можно сделать вывод о том, схема 3 позволяет добиться минимального времени обработки, это значит, что при одинаковых физико-механических свойствах количество абразива влияет на скорость резания, следовательно, при чередовании режимов подач «вода» и «абразив + вода» можно добиться большей скорости прошивки отверстий.

Зависимость кинетической энергии абразива от времени обработки приведена на рис. 5.

На основании приведенного графика можно сделать вывод о том, что схема 3 является наиболее предпочтительной при выборе нового способа подачи.

Кривую кинетической энергии абразивных частиц (см. рис. 5) можно подразделить на три зоны:

- первая зона соответствует процессу формирования сквозной трещины в преграде. Кинетическая энергия абразива полностью переходит во внутреннюю энергию разрушения материала преграды;
- вторая зона, зона с нулевой скоростью, соответствует процессу образования отверстия в преграде. При непрерывной подаче абразива происходит накопление его частиц во фронте формирования отверстия. Это мешает эффективному разрушению материала в результате вымывания водой;
- третья зона соответствует свободному протеканию суспензии через отверстие.

Таким образом, оптимальная частота подачи абразива может быть определена при реализации следующих действий:

- подать суспензию («абразив + вода») для начала образования в детали пластических деформаций;
- после формирования трещины на всю глубину детали переключить подачу «вода + абразив» на «воду» для того чтобы вода разгоняла и/или вымывала абразив из зоны обработки, формировав необходимое отверстие.

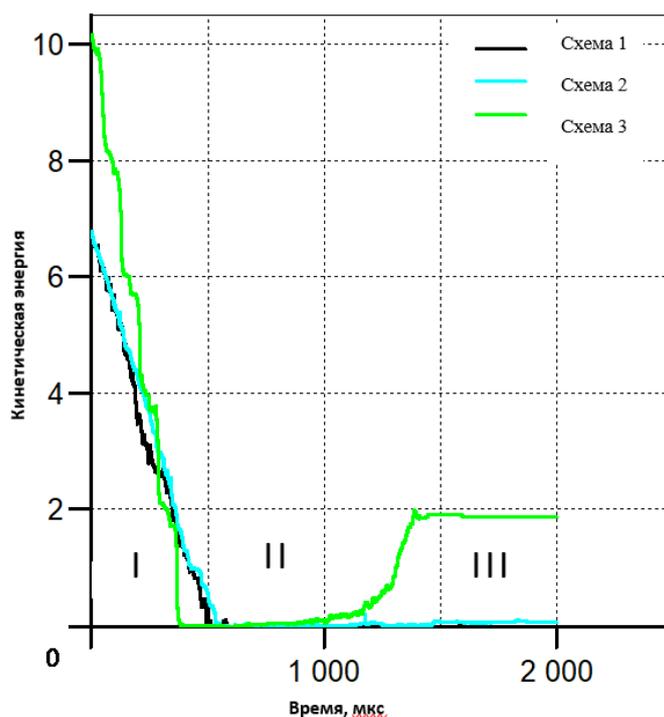


Рис. 5. Результаты моделирования. График кинетической энергии абразива:

I — первая зона; II — вторая зона; III — третья зона

Частота зависит от толщины, материала детали, скорости подачи суспензии, среды, в которой производится обработка. Для приведенного примера можно задать следующий режим обработки:

- подать суспензию для начала образования в детали пластических деформаций;
- к 300 мкс переключать подачу «вода + абразив» на «воду» для того чтобы вода разгоняла и/или вымывала абразив из зоны обработки.

Выводы. По результатам выполненной работы можно сделать следующие выводы.

1. Разработаны параметрические схемы гидроабразивной прошивки с двухфазной моделью суспензии, а также методика расчета процесса взаимодействия суспензии с преградой, основанная на численном решении уравнений механики сплошной среды методами Эйлера и Эйлера — Лагранжа в двумерной постановке.

2. В результате численного моделирования взаимодействия суспензии с преградой из обрабатываемого материала с использованием разработанной и пред-

ставленной методики в программном комплексе ANSYS/Autodyn выявлены физические особенности, свойственные рассматриваемому процессу в зависимости от физико-механических свойств используемых материалов.

3. Предложен метод нахождения частоты переключения подачи абразива в струеформирующий тракт.

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*, 2017, № 2. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.808901>
- [2] Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л. и др. Технично-экономическое обоснование выполнения контрольно-диагностических операций. *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*, 2015, № 1, с. 133–139.
- [3] Судник Л.В., Галиновский А.Л., Колпаков В.И. и др. Модернизация технологии оценки эксплуатационных динамических свойств композиционной конструкционной керамики путем использования гидроабразивной ультраструи. *Наука и образование: научное издание*, 2014, № 3. URL: <http://engineering-science.ru/doc/701307.html>
- [4] Абашин М.И., Галиновский А.Л., Бочкарев С.В. и др. Моделирование ультраструйного воздействия для контроля качества покрытий. *Физическая мезомеханика*, 2015, т. 18, № 1, с. 84–89.
- [5] 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, с. 59–67. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-9-59-67>
- [6] Алешков М.В., Волгина Л.В. Кинематические характеристики двухфазных потоков при гидроабразивной резке. *Вестник МГСУ*, 2019, № 12. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618>
- [7] Бабкин А.В., Колпаков В.И., Охитин В.Н. и др. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов. Т. 3. М., Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006.
- [8] Илюхина А.А., Вельтищев В.В., Галиновский А.Л. и др. Экспериментальное определение рациональных параметров элементов струеформирующего тракта установки для подводной гидроабразивной резки материалов. *Вестник брянского государственного технического университета*, 2018, № 7, с. 4–12. DOI: https://doi.org/10.30987/article_5ba8a1860f13c0.98445000
- [9] Kolpakov V.I. and Iliukhina A.A. Specifics of mathematical modeling of erosion of structures made out of different materials by high-speed hydro-abrasive water jet. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, no. 1, art. 170002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5133313>

Михайлова Мария Александровна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская федерация.

Смирнов Антон Владимирович — студент кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская федерация.

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

Научный руководитель — Илюхина Анна Алексеевна аспирант кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения» МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Михайлова М.А., Смирнов А.В. Сравнительный анализ эффективности работы генетического алгоритма при модификации оператора мутации в задаче коммивояжера. *Политехнический молодежный журнал*, 2022, № 01(66). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-01-763>

SUBSTANTIATION OF TECHNOLOGICAL REGIMES OF UNDERWATER HYDROABRASIVE PROCESSING OF METAL PRODUCTS

M.A. Mikhailova

mary.mihailowa1998@yandex.ru

SPIN-code: 3720-6607

A.V. Smirnov

a.v.smirnov98@gmail.com

SPIN-code: 3988-4510

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The paper considers the possibilities of increasing the productivity of mobile installations, in particular, in conditions of work under water (for flashing, cutting, cleaning metal products, etc.). A mathematical and parametric model is proposed for solving the problem in a two-dimensional formulation when processing parts with a two-phase suspension. As a result of numerical simulation in the ANSYS / Autodyn software environment, authors analyzed the influence of the structure and concentration of abrasive particles of the suspension on the effectiveness of the high-speed jet being formed. The presented solution allows not only to increase the service life of the focusing tube, but also to increase the productivity of waterjet processing. Recommendations are given on the method of switching the modes of abrasive supply to the jet-forming path.

Keywords

Waterjet machining, waterjet cutting, waterjet piercing, focusing nozzle, mathematical modeling, ANSYS / Autodyn, physical and mathematical model

Received 06.12.2021

© Bauman Moscow State Technical University, 2021

References

- [1] Grishchenko T.A., Melyukhov N.I., Lyubushkin V.O. Application of waterjet cutting when processing parts from polymer composite materials. *Vestnik inzhenernoy shkoly DVFU [FEFU: School of Engineering Bulletin]*, 2017, no. 2. DOI: <https://doi.org/10.5281/zeno.do.808901> (in Russ.).
- [2] Abashin M.I., Barzov A.A., Galinovskiy A.L. et al. Feasibility study performance the monitoring operations. *Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii [Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology]*, 2015, no. 1, pp. 133–139 (in Russ.).
- [3] Sudnik L.V., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I. et al. Modernization of technology to estimate composite constructional ceramics operational dynamic properties using a hydroabrasive ultrastream. *Nauka i obrazovanie: nauchnoe izdanie [Science and Education: Scientific Publication]*, 2014, no. 3. URL: <http://engineering-science.ru/doc/701307.html> (in Russ.).
- [4] Abashin M.I., Galinovskiy A.L., Bochkarev S.V. et al. Modeling of ultra-jet influence for coating quality control. *Fizicheskaya mezhmekhanika*, 2015, vol. 18, no. 1, pp. 84–89 (in Russ.).
- [5] Gerasimova A.M., Galinovskiy A.L., Kolpakov V.I. Analysis of the interaction between the abrasive jet stream and the inner surface of the jet forming nozzle. *Izvestiya vysshikh*

- uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 2015, no. 9, pp. 59–67. DOI: <http://dx.doi.org/10.18698/0536-1044-2015-9-59-67> (in Russ.).
- [6] Aleshkov M.V., Volgina L.V. Kinematic characteristics of two-phase flows in waterjet cutting. *Vestnik MGSU*, 2019, no. 12. DOI: <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2019.12.1610-1618> (in Russ.).
- [7] 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 physics of high-speed processes. Vol. 3]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2006 (in Russ.).
- [8] Ilyukhina A.A., Vel'tishchev V.V., Galinovskiy A.L. et al. Rational parameter experimental definition of elements for jet forming path of plant for underwater material hydroabrasive-jet cutting. *Vestnik bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Bryansk State Technical University], 2018, no. 7, pp. 4–12. DOI: https://doi.org/10.30987/article_5ba8a1860f13c0.98445000 (in Russ.).
- [9] Kolpakov V.I. and Ilyukhina A.A. Specifics of mathematical modeling of erosion of structures made out of different materials by high-speed hydro-abrasive water jet. *AIP Conf. Proc.*, 2019, vol. 2171, no. 1, art. 170002. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5133313>

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

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

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

Scientific advisor — Ilyukhina A.A., PhD Student, Department of Aerospace Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Mikhailova M.A., Smirnov A.V. Substantiation of technological regimes of underwater hydroabrasive processing of metal products. *Politekhniicheskiy molodezhnyy zhurnal* [Politechnical student journal], 2022, no. 01(66). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2022-01-763.html> (in Russ.).