

ИНЖЕНЕРНАЯ ФИЗИКА

Особенности процесса гидроабразивной резки сотовых панелей космических аппаратовА. А. Илюхина,¹ В. И. Колпаков,^{1,а} А. Л. Галиновский,¹ А. В. Хахалин^{2,б}¹ МГТУ им. Н. Э. Баумана, Россия, 105005, г. Москва² Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет, кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества. Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.

Статья поступила 25.08.2017, подписана в печать 15.01.2018.

Обосновываются рекомендации повышения эффективности гидро- и гидроабразивного резания сотовых конструкций, широко используемых в авиа- и ракетостроении, полученные путем численного решения пространственной динамической задачи, учитывающей физико-механические и кинематические параметры высокоскоростной струи, физико-механические и конструктивные параметры обрабатываемой сотовой конструкции и технологические параметры обработки (подача и угол встречи струи с лицевой поверхностью заготовки). Разработаны физико-математическая модель и методика численного анализа процесса. Иллюстрируются влияния перечисленных параметров на качество поверхностей обрабатываемых заготовок. Результаты расчетов сравниваются с экспериментальными данными.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, сотовая конструкция, технологические параметры, численное моделирование, физико-математическая модель, результаты расчетов, динамика разрушения.

УДК: 629.78, 621.924.93, 519.63 PACS: 02.70, 02.90.+p

В современном машиностроении активно развиваются и широко применяются технологии ультразвуковой обработки материала, в частности технологии гидро- и гидроабразивного резания (ГАР), оказывающие высокую конкуренцию другим видам резания [1–3]. Многие конструкции авиационной и ракетной техники изготавливаются именно данным способом обработки. ГАР позволяет осуществлять формообразование элементов из различных материалов, в том числе композиционных, включая сотовые конструкции. Причиной активного интереса к данному методу является ряд его преимуществ перед другими методами обработки. Так, использование водной (или гидроабразивной) струи позволяет экономить режущий инструмент при резке труднообрабатываемых конструкций. Кроме того, при использовании данного метода обработки практически полностью отсутствуют усилия резания, что позволяет минимизировать механические напряжения в обрабатываемом образце. Благодаря практически полному отсутствию термического воздействия на обрабатываемый материал этот метод зачастую является единственным возможным методом обработки. Кроме всего прочего, неотъемлемым преимуществом ГАР является его экологическая безопасность [4–6]. Все это является причиной активного изучения и развития данного метода. В последнее время проводились работы, направленные на совершенствование гидромашинных агрегатов [7]. Исследо-

валось влияние параметров ГАР на качество обрабатываемых поверхностей [8, 9] и эффективность этого процесса [10–12]. Проводились поиски рациональных технологических режимов ГАР [13–15]. Разрабатывались способы расчета и моделирования процесса гидроабразивного резания [16, 17]. Но проведенные исследования практически не касались вопроса обработки сотовых конструкций гидроабразивной струей.

Целью настоящей работы является разработка практических рекомендаций повышения эффективности гидро- и гидроабразивной обработки сотовых элементов конструкций ракетно-космической техники. При этом в качестве критерия эффективности рассматривается качество обработки поверхности сотовой конструкции. Поставленная задача решалась численно посредством поэтапного моделирования процесса с использованием уравнений механики сплошной среды в среде программного комплекса ANSYS Autodyn (License Number: 339001).

Параметрическая схема изучаемого процесса представлена на рис. 1 и включает гидроабразивную струю (1) диаметром d_c , вытекающую из фокусирующего сопла (2) со скоростью V_c под углом α к сотовому пакету (3). При этом струеобразующий блок имеет подачу S , направленную параллельно сотовому пакету. Сотовый пакет в свою очередь состоит из двух алюминиевых облицовочных листов (4, 5) толщиной $\delta_1 = 2$ мм и $\delta_2 = 2$ мм, разделенных между собой сотовыми перегородками (6) высотой $H = 8$ мм и толщиной $\delta_3 = 0.5$ мм. Расстояние между сотами принималось равным δ_4 , числовое значение которого

^а E-mail: kolpakov54@mail.ru^б E-mail: avkhakhalin@mail.ru

варьировалось в процессе исследования в диапазоне от 1.5 до 3.5 мм. Кроме того, в процессе исследования варьировалась концентрация гидроабразива в струе, угол встречи струи с заготовкой $\alpha = 0 - 60^\circ$ и скорость подачи $S = 0.0 - 20.0$ м/с.

Процесс ГАР сотовой конструкции можно описать следующей системой дифференциальных уравнений, представленной в тензорном виде [18]:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{dt} + \rho \nabla_i v^i &= 0; \quad \rho \frac{dv_i}{dt} = \nabla_i \sigma_i^j; \\ \rho \frac{dE}{dt} &= \sigma^{ij} \dot{\varepsilon}_{ij}; \quad p = p(\rho, E); \\ \dot{\varepsilon}_{ij} &= (\nabla_i v_j + \nabla_j v_i) / 2; \quad \sigma_{ij} = -p g_{ij} + D_{ij}; \\ \frac{dD_{ij}}{dt} &= 2G \left(\dot{\varepsilon}_{ij} + \frac{1}{3\rho} \frac{d\rho}{dt} g_{ij} \right); \quad D^{ij} D_{ij} \leq 2\sigma_T^2 / 3; \\ \varepsilon_i &= \sqrt{2} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 - \varepsilon_1)^2} / 3 \geq \varepsilon^*. \end{aligned}$$

Здесь ρ — плотность, p — давление, E — удельная внутренняя энергия, t — текущее время, $i, j = x, y, z$ — координаты метрической системы координат, v_i — 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 напряжения, D_{ij} — компоненты девиатора напряжений, $\dot{\varepsilon}_{ij}$ — компоненты тензора скоростей деформаций, G — модуль сдвига, σ_T — динамический предел текучести среды, ε_i — интенсивность деформаций, выраженная через ее главные составляющие $(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3)$. В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы, импульса и энергии, в общем виде уравнения состояния взаимодействующих сред, 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 использовался критерий предельных пластических деформаций типа Смирнова—Аляева [19], в котором критические значения пластических деформаций задавались равными $\varepsilon^* = 0.01 - 0.1$ [20]. При этом принималось, что при достижении уровня интенсивности деформаций в материале заготовки, превышающем критические значения, материал последней считался разрушенным, т. е. терял свою прочность и вел себя как сыпучее твердое тело. Таким образом, выбранный критерий позволяет имитировать влияние концентрации абразива на заготовку, не вводя в модель дополнительных элементов. С понижением числовых значений ε^* увеличивается количество очагов разрушения и интенсивность трещинообразования, что соответствует увеличению концентрации абразива в струе жидкости.

В качестве уравнений состояния взаимодействующих материалов использовались следующие соотношения. Для воды

$$\begin{aligned} p &= A_1 \mu + A_2 \mu^2 + A_3 \mu^3 + (B_0 + B_1 \mu) \rho_0 e \\ \text{при } \mu &= (\rho / \rho_0 - 1) \geq 0 \\ \text{и } p &= T_1 \mu + T_2 \mu^2 + B_0 \rho_0 e \quad \text{при } \mu \leq 0, \end{aligned}$$

где 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 сотовой панели принимался алюминиевый сплав АМг6, поведение которого хорошо описывается линейной баротропной зависимостью

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

где $K = 60.5$ ГПа — модуль объемного сжатия, $\rho_0 = 2.64$ г/см³ — начальная плотность. Другие физико-механические параметры упругопластической модели для АМг6 принимались следующими: модуль сдвига $G = 26.3$ ГПа, предел текучести $\sigma_T = 0.3$ ГПа.

Для решения поставленной задачи необходимо также задать начальные и граничные условия. Для этого будем полагать, что скорость струи в начальный момент времени определяется величиной $V_c = 0.8$ км/с, принятой в расчетах постоянной величиной. Граничные условия для рассматриваемой задачи в рамках параметрической схемы (рис. 1) можно разбить на две группы. А именно: на границе раздела двух взаимодействующих между собой сред (вода—заготовка) при наличии контакта всегда выполняется равенство нормальных напряжений и условие непротекания, т. е.

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

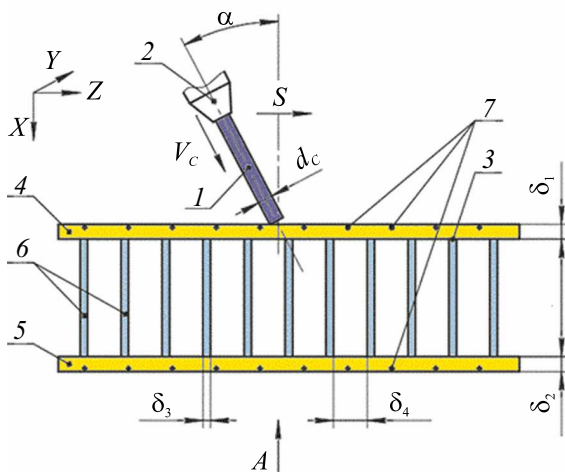


Рис. 1. Параметрическая схема процесса ГАР: 1 — струя воды; 2 — сопловой блок; 3 — сотовая панель, где 4, 5 — верхняя и нижняя обшивки соответственно, 6 — перегородки; 7 — реперные точки (маркеры)

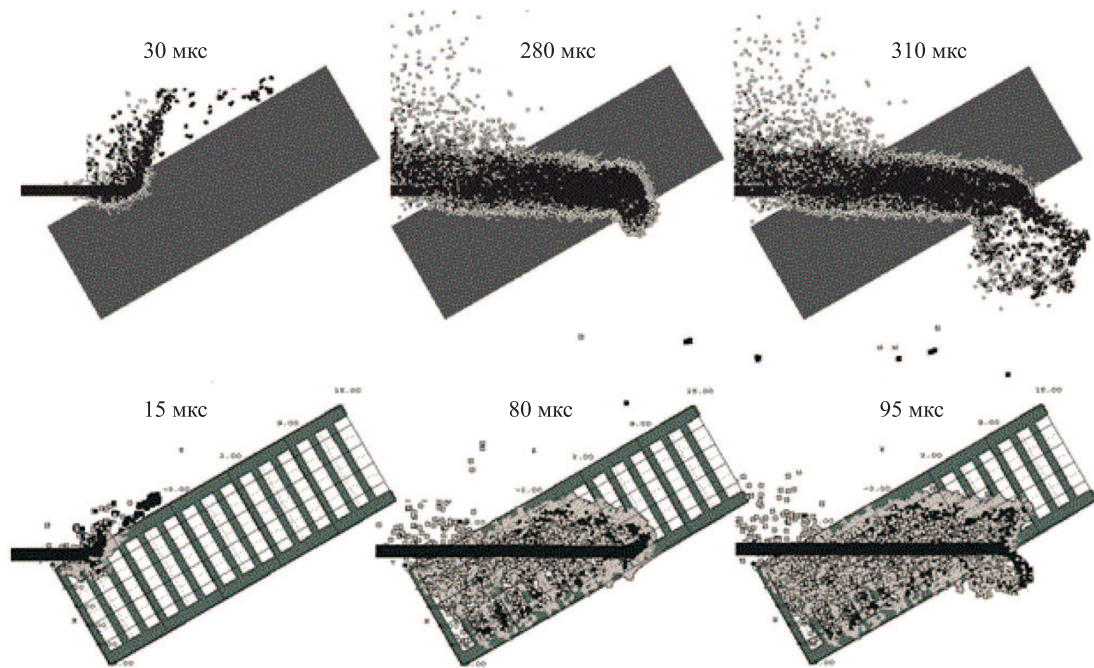


Рис. 2. Характер движения гидроабразивной струи при резке монолитной заготовки (а) и сотовой конструкции (б)

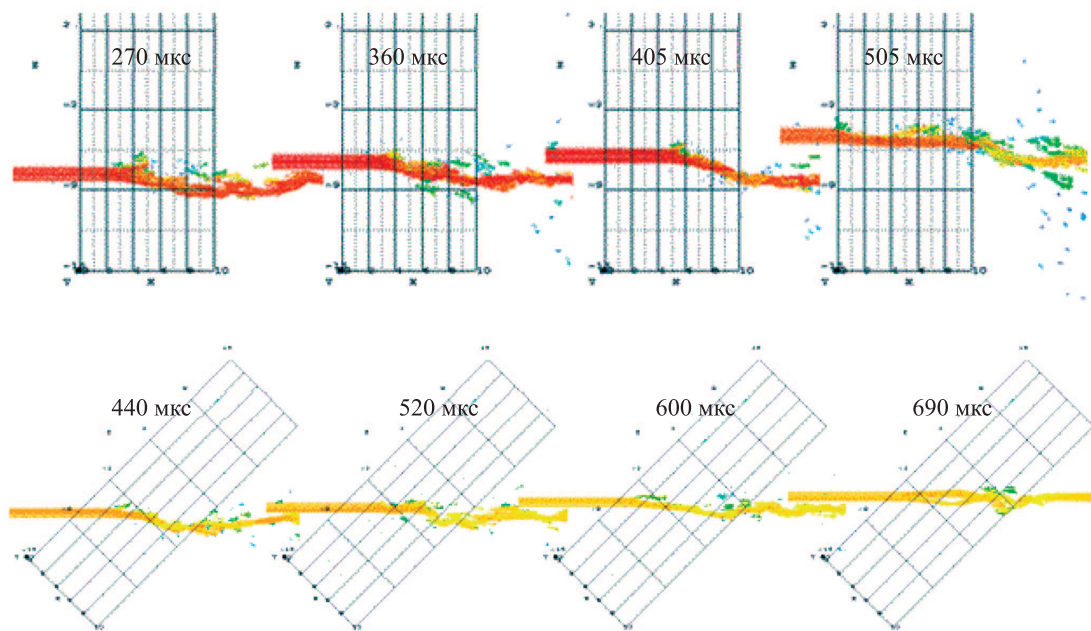


Рис. 3. Развитие асимметрии движения струи в процессе резки сотовой конструкции под углом 0° (а) и 45° (б)

Поставленная пространственная задача решалась численно методом SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [21] в среде Ansys Autodyn. Выполненные расчеты выявили ряд интересных особенностей, присущих именно ультраструйной резке сотовых конструкций. Так, например, были замечены различия в поведении режущего инструмента (струи) при обработке монолитного материала и сотовой конструкции. В обоих случаях наблюдалось существенное искажение траектории движения струи относительно прямолинейного направления.

Однако если в первом случае указанное искажение происходило на тыльной стороне заготовки (рис. 2, а), то во втором — отклонение от прямолинейности наблюдалось уже при прошивке верхней обшивки (рис. 2, б).

Существенное искажение симметричности движения струи в процессе резки сотовой конструкции наблюдалось также при увеличении скорости подачи (S) вне зависимости от угла встречи гидроабразивной струи с заготовкой (α) и усиливалось по мере движения струи сквозь заготовку (рис. 3).

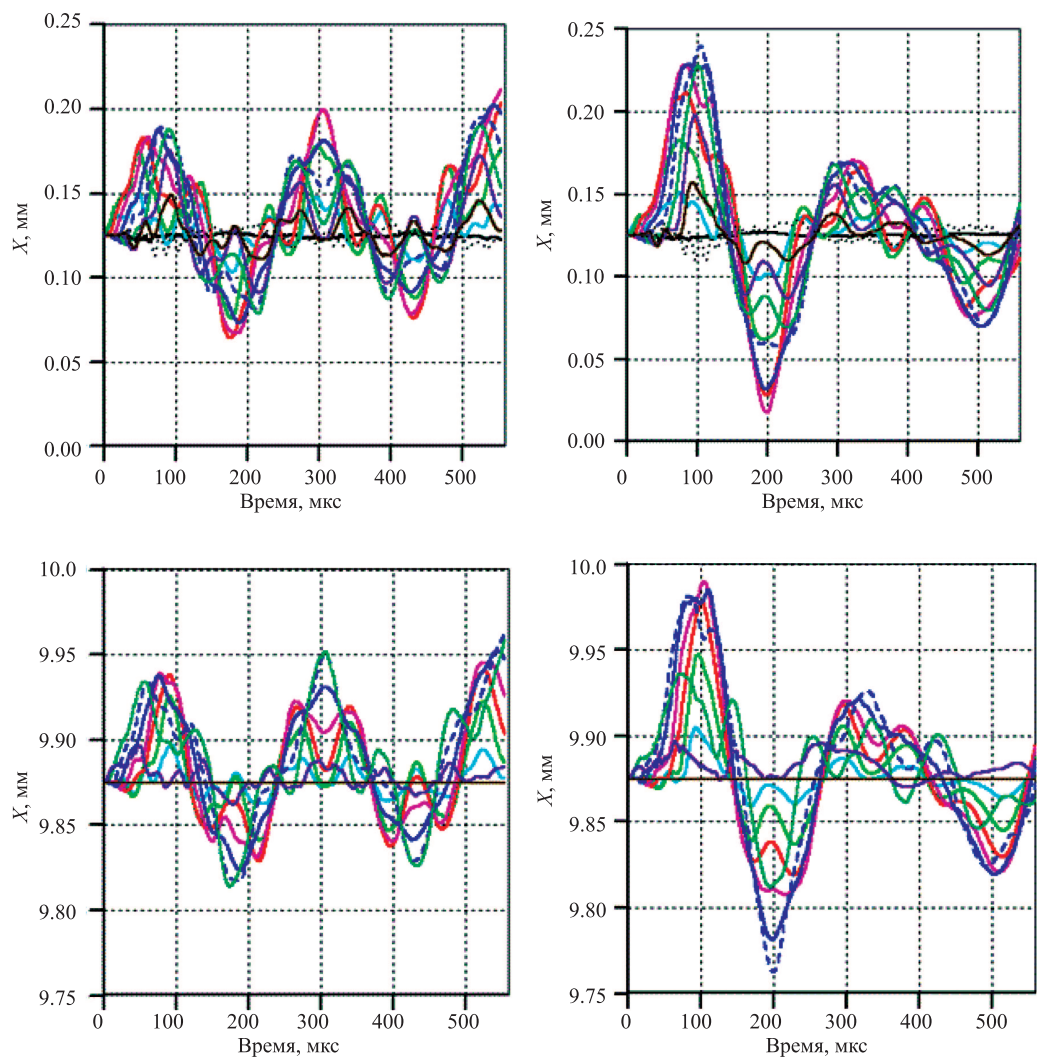


Рис. 4. Амплитуды колебаний верхней (а, б) и нижней (в, г) обшивок сотовой конструкции при угле встречи 0° (а, в) и 45° (б, г)

Указанные закономерности, по нашему мнению, сказываются на качестве обработки нижней обшивки сотовой панели.

Для оценки интенсивности колебательного движения верхней и нижней обшивок сотовой конструкции в зависимости от угла обработки гидроабразивной струей панель маркировалась реперными точками (маркерами), в которых дополнительно рассчитывались кинематические параметры исследуемого процесса. При этом предполагалось, что с увеличением угла встречи интенсивность колебательного процесса обеих пластин уменьшается, а качество обрабатываемой поверхности увеличивается [6]. Однако, как показали выполненные расчеты, иллюстрирующие указанную динамику, выявить существенного изменения характера колебательного движения обеих пластин с увеличением угла встречи не удалось (рис. 4).

Из представленных графических зависимостей и данных табл. 1 видно также, что незначительное снижение амплитуды колебания обшивок сотовой конструкции может быть достигнуто путем умень-

Табл. 1. Зависимость амплитуды колебания обшивок сотовой конструкции от параметров ГАР

Варьируемый параметр	Значение параметра	Амплитуда колебаний, мм	
		Верхняя пластина	Нижняя пластина
$\varepsilon_{кр}$	0.1	0.27	0.28
	0.01	0.22	0.23
S , м/с	10	0.22	0.23
	20	0.18	0.17
δ_4 , мм	3.5	0.24	0.25
	1.5	0.22	0.23
α , °	60	0.24	0.26
	45	0.22	0.23
	30	0.15	0.16
	0	0.14	0.14

шения угла встречи гидроабразивной струи с лицевой поверхностью заготовки, а также путем уменьшения расстояния между перегородками сотового заполнителя или путем увеличения скорости подачи

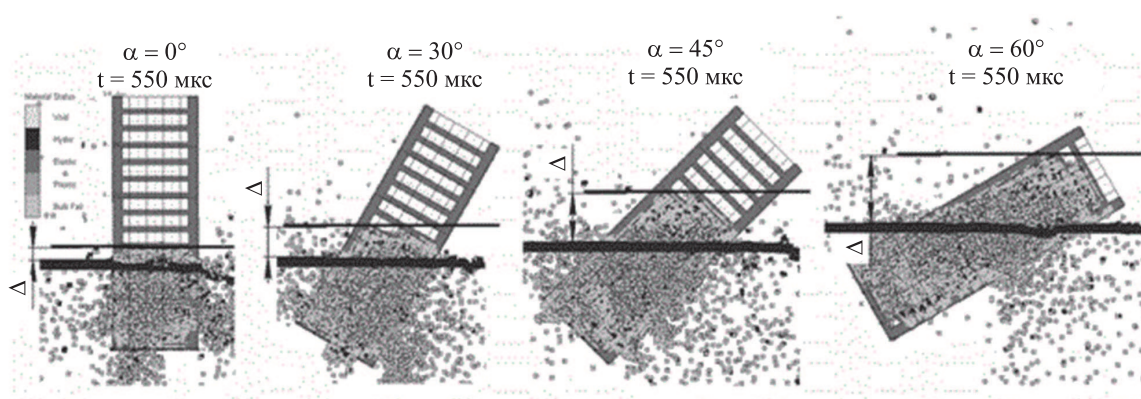
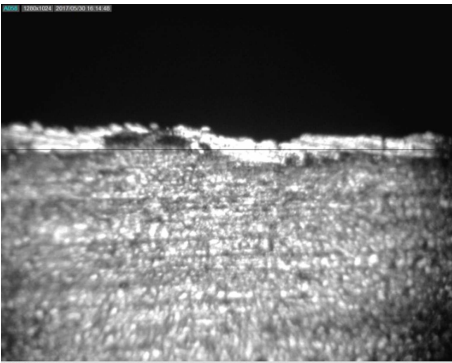
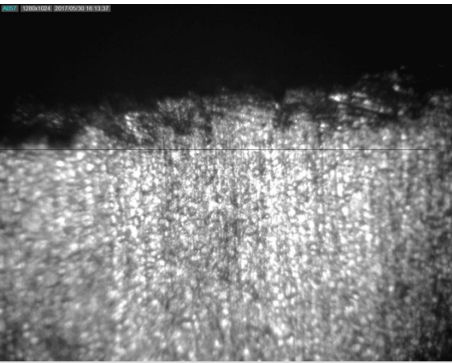
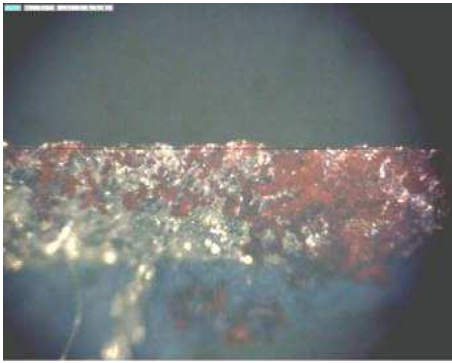
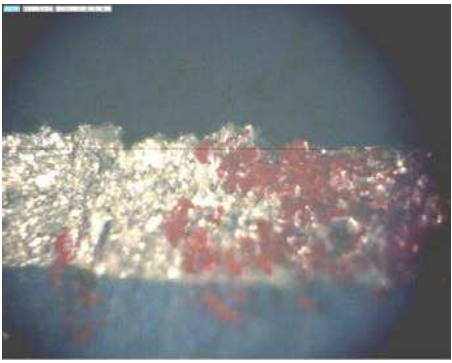


Рис. 5. Характер изменения области высоких пластических деформаций (Δ) в зависимости от угла встречи струи с сотовой конструкцией

Табл. 2.

Содержание иллюстрации	$\alpha = 0$	$\alpha > 0$
Фотографии профиля реза нижнего облицовочного листа (поз. 5, рис. 1); вид по стрелке А.		
Фотографии профиля реза нижнего облицовочного листа в масштабе 60:1; вид по стрелке А.		
Фотографии профиля реза нижнего облицовочного листа в масштабе 60:1; вид в плоскости рис. 1.		

и концентрации абразива в струе. Кроме того, как видно из представленных результатов, с увеличением угла встречи струи с поверхностью заготовки в ней увеличивается область высоких пластических деформаций, определяющих зону разрушения материала вокруг струи (рис. 5). Данное обстоятельство может оказать существенное влияние на качество поверхности полученного реза, т. е. чем дальше от струи реализуются высокие пластические деформации, тем больше вероятность увеличения шероховатости поверхности в области обработки.

В соответствии со схемой обработки, приведенной на рис. 1, был выполнен эксперимент, при котором осуществлялось варьирование угла встречи режущей струи (α) с заготовкой. Полученные результаты, иллюстрирующие ухудшение качества реза тыльной пластины сотовой панели с увеличением угла α , приведены в табл. 2 и на рис. 6.

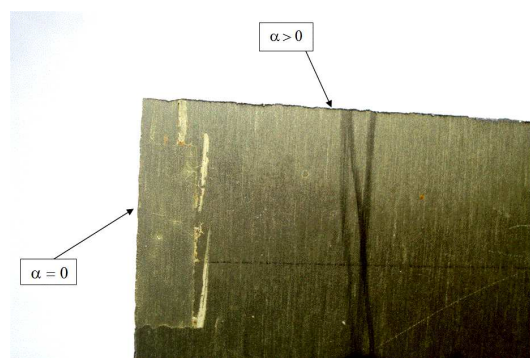


Рис. 6. Сравнение качества реза тыльной поверхности сотовой конструкции при различных углах встречи струи с заготовкой

По результатам выполненного исследования можно сделать следующие выводы.

1. В рамках численного решения пространственной задачи механики сплошной среды взаимодействия гидроабразивной струи с сотовыми конструкциями разработана физико-математическая модель и методика расчета процесса гидроабразивной резки с учетом концентрации абразива, величины подачи, скорости и угла встречи струи с поверхностью обрабатываемой детали из разных конструкционных материалов.

2. Установлена взаимосвязь перечисленных параметров на развитие процесса гидроабразивного резания. При этом показано, что характер разрушения сотовой панели отличается от характера разрушения монолитного материала, а также то, что угол встречи струи с лицевой поверхностью заготовки незначительно влияет на амплитуду колебаний верхней и нижней пластин сотовой конструкции, однако сказывается на качестве поверхности в области обработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степанов Ю. С., Бурнашов М. А., Головин К. А. Прогрессивные технологии гидроабразивного резания материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009.
2. Тихомиров Р. А., Гуенко В. С. Гидроабразивное резание неметаллических материалов. Киев: Техника, 1984.
3. Тихомиров Р. А., Петухов Е. Н. // Использование сверхзвуковой струи жидкости в качестве режущего инструмента. Проблемы теории проектирования и производства инструмента: Тез. докл. совещания Тула: ТулГУ. 1995. С. 10.
4. Герасимова А. М., Галиновский А. Л., Колпаков В. И. // Изв. вузов. Машиностроение. 2015. № 9(666). С. 59.
5. Сазанов И. И., Лядник А. М., Лядник С. В. // Технология машиностроения. 2013. № 3. С. 11.
6. Тарасов В. А., Галиновский А. Л., Елфимов В. М. // Изв. вузов. Сер. Машиностроение. 2011. № 4. С. 46.
7. Hashish M. On The Modeling of Abrasive-Waterjet Cutting // 7th International Symposium on Jet Cutting Technology. Ottawa. Canada. 1984. P. 249.
8. Hloch S. et al. // The Int. J. of Advanced Manufacturing Technology. 2013. 66. P. 45.
9. Степанов Ю. С., Бурнашов М. А., Степанищев М. А. // Изв. ОрелГТУ. 2009. № 2–3. С. 64.
10. Барсуков Г. В. Повышение эффективности гидроабразивного резания на основе дискретного регулирования состояний технологической системы: Автореф. дисс. ... доктора техн. наук. Орел. 2006. 32 с.
11. Hloch S. et al. // J. of Naval Science and Engineering. 2011. 7, № 1. P. 71.
12. Орел В. Н., Щетинин В. Т., Саленко А. Ф., Яцына Н. Н. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2016. № 1 (7). С. 45.
13. Abdel-Rahman A. A. El-Domiaty A. A. // Wear. 1998. 218. P. 216.
14. Chen W. L. et al. // Proceedings of the 5th Waterjet Technology Conference. Toronto. 1989. P. 217.
15. Елфимов В. М. Разработка методики выбора технологических режимов гидроабразивной резки материалов и конструкций по технико-экономическому критерию: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Москва. 2013. 16 с.
16. Ерухимович Ю. Э. Математическое моделирование и совершенствование метода расчета эффективности процесса резания горных пород гидроабразивным инструментом: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Тула. 1999. 16 с.
17. Kyriaki Maniadaki et al. // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. 2007. 31. P. 933.
18. Бабкин А. В., Колпаков В. И., Охитин В. Н., Селиванов В. В. Численные методы в задачах физики быстропротекающих процессов: Учеб. для вузов. В 3 т. — Т. 3 М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
19. Селиванов В. В. Механика разрушения деформируемого тела: Учеб. для вузов. В 3 т. Т. 2. М.: Изд. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006.
20. Анисимов П. Д., Колпаков В. И. // Молодежный научно-технический вестник. 2016. № 9. С. 1.
21. Паршиков А. Н. // ЖВМиМФ 1999. 39, № 7. С. 1216.

The Features of Hydroabrasive Cutting of Honeycomb Panels of Space Vehicles

A. A. Ilyukhina¹, V. I. Kolpakov^{1,a}, A. L. Galinovskii¹, A. V. Khakhalin^{2,b}

¹*Bauman Moscow State Technical University, Moscow 105005, Russia.*

²*Department of Physics, Moscow State University, Moscow 119991, Russia.*

E-mail: ^akolpakov54@mail.ru, ^bavkhakhalin@mail.ru.

We substantiate the recommendations for improving the efficiency of hydro- and hydroabrasive cutting of the honeycomb structures that are widely used in aircraft and rockets, obtained by numerical solving of the spatial dynamic problem with allowance for the physico-mechanical and kinematic parameters of a high-speed jet, the physico-mechanical and structural parameters of the treated honeycomb structure, and the parameters of the technological treatment (feeding and the impact angle of the jet with the face surface of the blanks). A physico-mathematical model and a method of numerical analysis of the process have been developed. The influence of the above parameters on the quality of the surfaces of the treated blanks is illustrated. The results of the calculations are compared with the experimental data.

Keywords: hydroabrasive cutting, honeycomb structure, technological parameters, numerical simulation, physico-mathematical model, calculation results, fracture dynamics.

PACS: 02.70, 02.90.+p.

Received 25 August 2017.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2018. **73**, No. 4. Pp. 441–446.

Сведения об авторах

1. Илюхина Анна Андреевна — студент; тел.: (499) 263-65-96, e-mail: opti156@yandex.ru.
2. Колпаков Владимир Иванович — профессор, докт. техн. наук; тел.: (499) 263-65-96, e-mail: kolpakov54@mail.ru.
3. Галиновский Андрей Леонидович — профессор, докт. техн. наук; тел.: (499) 263-65-96, e-mail: galcomputer@mail.ru.
4. Хахалин Андрей Владимирович — канд. физ.-мат. наук., ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-40-34, e-mail: avkhakhalin@mail.ru.