

# 07, июль 2017

УДК 629.78:621.924.93:519.63

### **Численное моделирование процесса гидроабразивной резки сотовых панелей летательных аппаратов**

*Илюхина А.А., студент*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения»*

*Колпаков В.И., д.т.н., профессор*

*Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н. Э. Баумана,  
кафедра «Технологии ракетно-космического машиностроения»*

[cm12@sm.bmstu.ru](mailto:cm12@sm.bmstu.ru)

В современном машиностроении активно развиваются и широко применяются технологии ультраструйной обработки материала, в частности, технологии гидро- и гидроабразивного резания (ГАР). 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 [1-3].

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 ANSYA Autodyn (License Number: 339001).

Параметрическая схема изучаемого процесса представлена на рис. 1 и включает в себя гидроабразивную струю (1) диаметром  $d_c$ , вытекающую из фокусирующего сопла (2) со скоростью  $V_c$  под углом  $\alpha$  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  $\delta_4$ , числовое значение которого 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  $\alpha = 0 \dots 60^\circ$  и скорость подачи  $S = 0,0 \dots 20,0$  м/с.

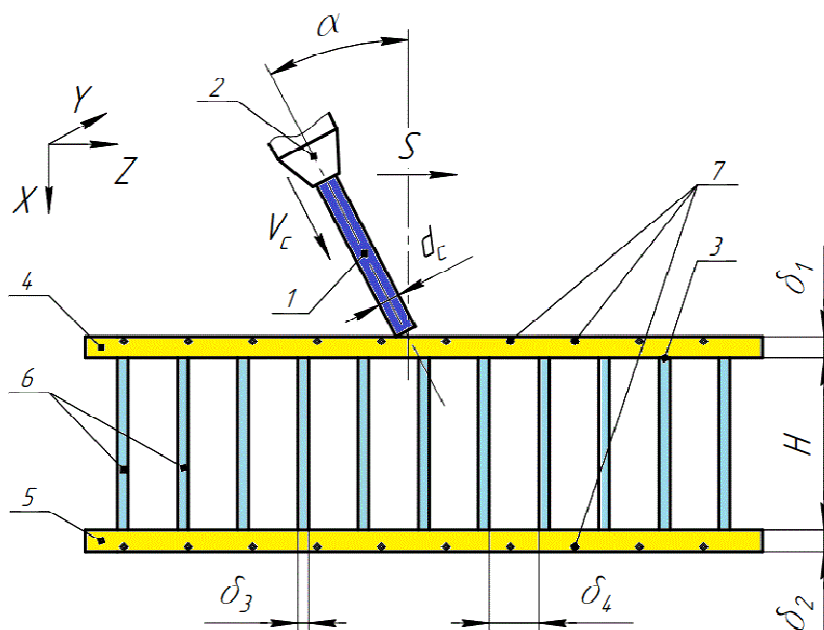


Рис. 1. Параметрическая схема процесса ГАР: 1 – струя воды; 2 – сопловой блок; 3 – сотовая панель, где 4, 5 – верхняя и нижняя обшивки соответственно, 6 – перегородки; 7 – реперные точки (маркеры)

Процесс ГАР сотовой конструкции можно описать системой дифференциальных уравнений, включающей в себя законы сохранения массы, импульса и энергии, уравнения состояния взаимодействующих сред, кинематические и физические соотношения, описывающие деформирование и разрушение упругопластической среды под действием высокоскоростного набегающего потока гидроабразивной струи [4]. Для описания разрушения элементов сотовой конструкции использовался критерий предельных пластических деформаций типа Смирнова – Аляева [5], в котором критические значения пластических деформаций задавались равными  $\epsilon^* = 0,01 \dots 0,1$  [6]. 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  $\epsilon^*$  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

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

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

где  $\rho_0$ ,  $\rho$  и  $\mu$  – начальная, текущая 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 АМгб, 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/см<sup>3</sup> – начальная плотность. Другие физико-механические параметры упругопластической модели для АМгб 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.

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

Поставленная пространственная задача решалась численно методом SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) [7] в среде Ansys Autodyn. Выполненные расчеты выявили ряд интересных особенностей, присущих именно ультразвуковой 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).

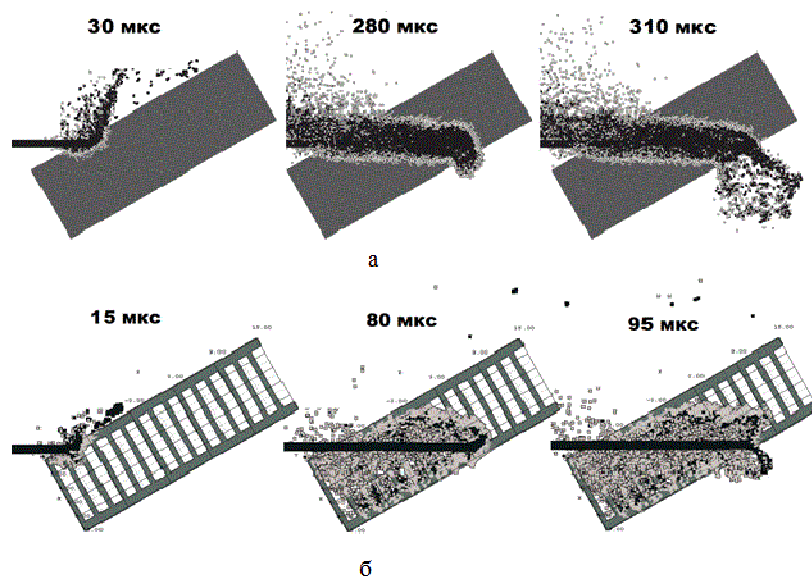


Рис. 2. Характер движения гидроабразивной струи при резке монолитной заготовки (а) и сотовой конструкции (б)

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 ( $\alpha$ ) и усиливалось по мере движения струи сквозь заготовку (рис. 3). Указанные закономерности, по нашему мнению, сказываются на качестве обработки нижней обшивки сотовой панели.

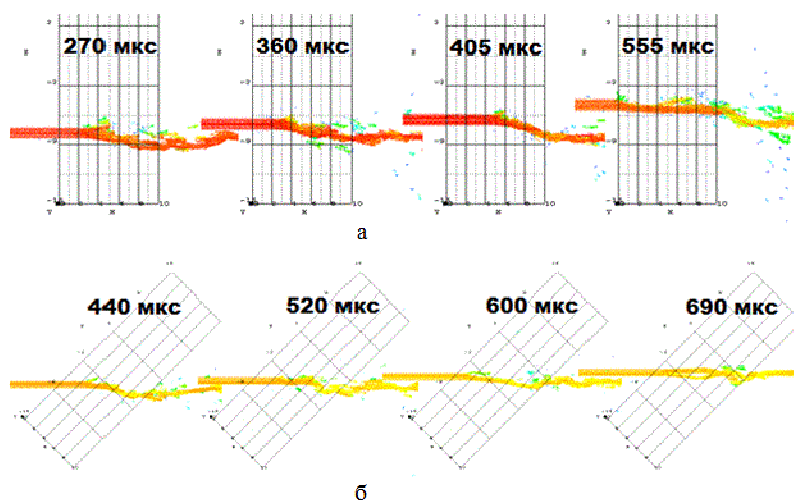


Рис. 3. Развитие асимметричности движения струи в процессе резки сотовой конструкции под углом  $0^\circ$  (а) и  $45^\circ$  (б)

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 [3]. Однако, как показали выполненные расчеты, иллюстрирующие указанную динамику, выявить существенного изменения характера колебательного движения обеих пластин с увеличением угла встречи не удалось (рис. 4). Как видно из представленных иллюстраций и таблицы, незначительное снижение амплитуды колебания обшивок сотовой конструкции может быть достигнуто путем уменьшения угла встречи гидроабразивной струи с заготовкой и расстояния между перегородками сотового заполнителя или путем увеличения скорости подачи и концентрации абразива.

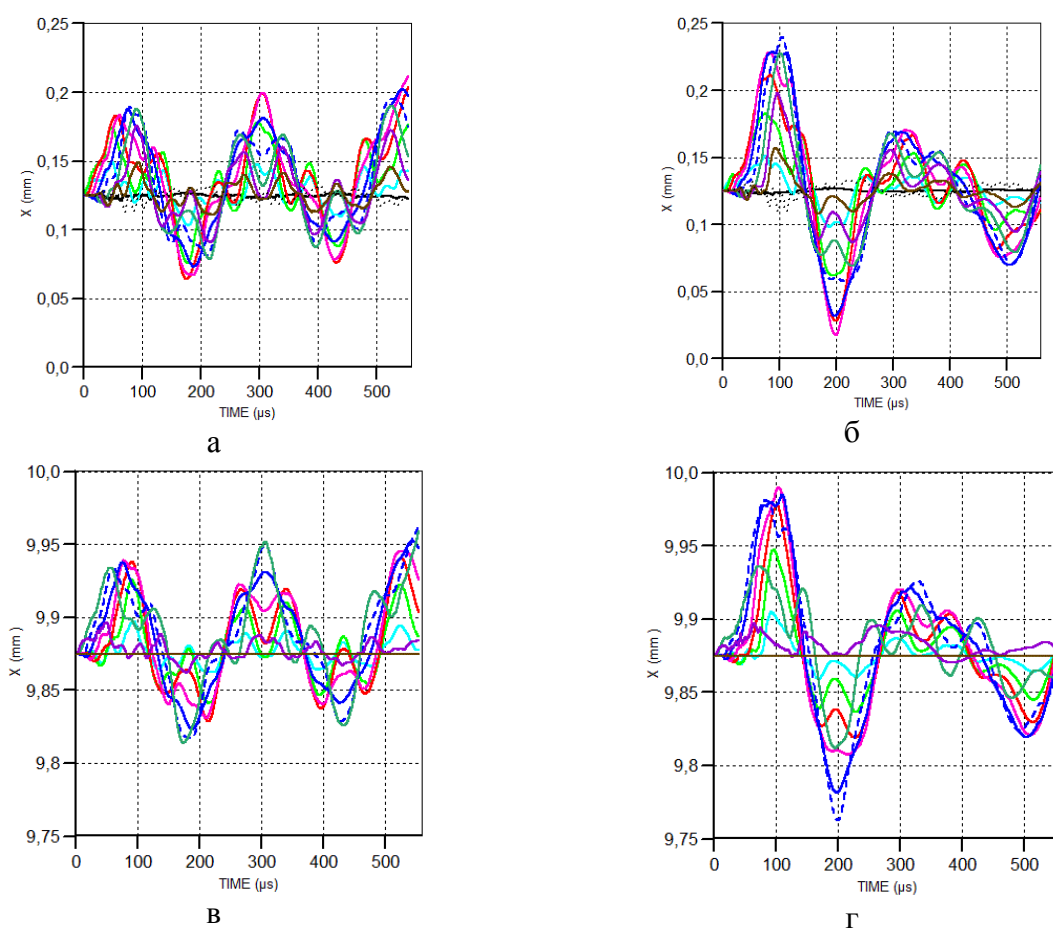


Рис. 4. Амплитуды колебаний верхней (а, б) и нижней (в, г) обшивок сотовой конструкции при угле встречи  $0^\circ$  (а, в) и  $45^\circ$  (б, г)

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	10 м/с	0,22	0,23
	20 м/с	0,18	0,17
$\delta_4$	3,5 мм	0,24	0,25
	1,5 мм	0,22	0,23
$\alpha$	60°	0,24	0,26
	45°	0,22	0,23
	30°	0,15	0,16
	0°	0,14	0,14

Из представленных графических зависимостей и данных таблицы видно также, что незначительное снижение амплитуды колебания обшивок сотовой конструкции может быть достигнуто путем уменьшения угла встречи гидроабразивной струи с лицевой поверхностью заготовки, а также путем уменьшения расстояния между перегородками сотового заполнителя или путем увеличения скорости подачи и концентрации абразива в струе. Кроме того, как видно из представленных результатов, с увеличением угла встречи струи с поверхностью заготовки в последней 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.

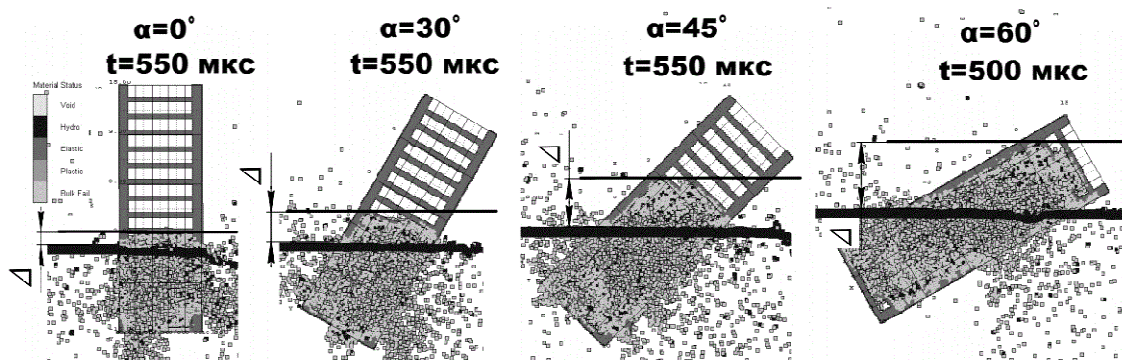


Рис. 5. Характер изменения области высоких пластических деформаций ( $\Delta$ ) в зависимости от угла встречи струи с сотовой конструкцией

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]. Герасимова А.М., Галиновский А.Л., Колпаков В.И. Анализ взаимодействия гидроабразивной струи с внутренней поверхностью канала фокусирующего сопла // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2015. № 9 (666). DOI: 10.18698/0536-1044-2015-9-59-67.
- [2]. Сазанов И.И., Лядник А.М., Лядник С.В. Современное состояние и перспективы развития технологии гидроструйной и гидроабразивной резки // Технология машиностроения. 2013. № 3. С. 11-14.
- [3]. Тарасов В.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М. Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки // Известия ВУЗов. Машиностроение. 2011. № 4. С. 46-53.
- [4]. Селиванов В.В., Бабкин А.В. Прикладная механика сплошной среды: учебник для вузов. В 3 т. Т. 1. Основы механики сплошных сред. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 376 с.
- [5]. Селиванов В.В. Прикладная механика сплошных сред: учебник для вузов. В 3 т. Т. 2. Механика разрушения деформируемого тела. 2-е изд., испр. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 424 с.
- [6]. Анисимов П.Д. Особенности математического моделирования гидро- и гидроабразивной обработки деталей из труднообрабатываемых материалов // Молодежный научно-технический вестник. 2016. № 9. Режим доступа: <http://sntbul.bmstu.ru/doc/848937.html> (дата обращения 19.05.2017).

- [7]. Паршиков А.Н. Применение решения задачи Римана в методе частиц // Журнал вычислительной математики и математической физики. 1999. Т. 39. № 7. С.1216-1225.