



КАЗАКОВА
Ольга Игоревна
студентка



КОЛПАКОВ
Владимир Иванович
кандидат технических
наук, доцент
кафедры «Технологии
ракетно-космического
машиностроения»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)
e-mail:
vorobushek11@gmail.com

Численное моделирование гидроабразивной резки листовых заготовок из алюминиевых сплавов

О.И. Казакова, В.И. Колпаков

Приведена физико-математическая постановка задачи процессов гидро- и гидроабразивной резки деталей из листовых заготовок алюминиевых сплавов. На конкретном примере рассмотрены особенности решения поставленной задачи на базе численных методов механики сплошной среды и зависимость исследуемого вида обработки от кинематических и физико-математических свойств инструмента (высокоскоростной струи) и обрабатываемой детали (мишени). Проанализированы возможности использования деформационного критерия разрушения материала детали из алюминиевого сплава АМгб.

Ключевые слова: математическая модель, гидрорезка, гидроабразивная резка, листовая заготовка, алюминиевый сплав, деформационные критерий разрушения, численное моделирование.

Numerical modeling of abrasive water Jet cutting of sheet billets from aluminum alloys

O.I. Kazakova, V.I. Kolpakov

The paper covers the physical and mathematical problem formulation of water jet and abrasive water jet cutting operations of parts from aluminum alloys sheet billets. The features of the problem solution based on numerical methods of continuum mechanics and the dependence of this operation type on kinematic and physico-mechanical properties of the instrument (high-speed jet) and the workpiece (target) are shown by the particular example. Advantages of using the deformation criterion of the material failure (aluminum alloy AMg6) are discussed.

Keywords: mathematical model, water jet cutting, abrasive water jet cutting, sheet billet, aluminum alloy, deformation failure criterion, numerical modeling.

Такие методы обработки поверхностей заготовок, как точение, фрезерование, протягивание и шлифование, характеризуются тем, что режущие элементы инструмента в течение всего процесса удаления материала соприкасаются с обрабатываемыми поверхностями. Вследствие этого обработка материалов сопровождается нагревом и вибрацией инструмента и всей технологической системы в целом (станок, приспособление, заготовка), а также деформацией металла в зоне действия режущей кромки.

Необходимость обработки сложных фасонных поверхностей обусловила создание новых методов обработки, характеризующихся

отсутствием непосредственного механического контакта инструмента с заготовкой. В этих методах инструментом является либо электрическое поле (электрохимическая обработка), либо высокоскоростной направленный поток различных материалов на заготовку (гидроструйная, пескоструйная, дробеструйная обработки, обработка шариками и т. д.). Так, например, в настоящее время технологии гидро-резания (ГР) и гидроабразивного резания (ГАР) металлов, тугоплавких, жаропрочных и титановых сплавов, конструкционной керамики и композиционных материалов продемонстрировали высокую конкурентоспособность по сравнению с механическим, лазерным, плазменным и другими высокотехнологичными видами резания.

Физико-технологическую основу гидроструйных технологий составляет непрерывный высокоэнергетический поток жидкости, называемый также ультраструей, играющий роль основного формообразующего инструмента. Его режущая способность обусловлена составом и удельной кинетической энергией. ГР и ГАР имеют минимальные отличия. В первом случае (ГР) обработку материала обеспечивает водяная струя. Во втором случае (ГАР) струя разгоняет частицы абразива и эти частицы вместе со струей воды реализуют формообразующее воздействие на материал детали. У каждого вида резания свое назначение. Гидрорезкой без абразива режут мягкие материалы, а гидроабразивной резкой — твердые материалы, например, металлы, композиты и керамику, хотя в целом ГАР существенно эффективнее ГР [1, 2].

Настоящая работа посвящена исследованию процессов ГР и ГАР на базе численных методов механики сплошной среды с использованием современного программного комплекса ANSYS AUTODYN. Цель работы — установление закономерностей рассматриваемого вида обработки от кинематических и физико-механических свойств инструмента (высокоскоростной струи) и обрабатываемой детали (мишени).

Поставленная задача решалась в двух стратегиях. В первой из них струя считалась подвиж-

ной, а мишень (преграда) — неподвижной, во второй, наоборот, мишень считалась подвижной, а струя неподвижной. При этом предполагалось, что вторая стратегия позволит более аккуратно изучить вопросы воздействия именно гидроабразивной струи на обрабатываемый материал. В процессе исследования использовались следующие материалы: для жидкой струи — вода, для преграды — алюминиевый сплав АМг6; для частиц абразива — кварцевый песок. Физико-механические характеристики материалов приведены в таблице. Диаметр струи был принят $d = 1,0$ мм, скорость струи $V_0 = 0,8$ км/с, размер частиц абразива 0,4 мм, толщина преграды $h = 5$ мм.

Таблица

Физико-механические характеристики взаимодействующих материалов

Физико-математические характеристики	Обозначение	Материал	
		АМг6	SiO ₂
Плотность, г/см ³	ρ_0	2,64	232
Модуль сдвига, ГПа	G	26,3	31
Предел текучести, ГПа	Y	0,15	0,15
Критическая интенсивность деформации	ε^*	0,43	0343
Модуль объемного сжатия, ГПа	K	60	160

Идеализированные расчетные схемы ГР и ГАР показаны на рис. 1.

Поставленная задача решалась в двумерной осесимметричной постановке в переменных Эйлера. В этом случае система исходных соотношений имеет классический вид [3—5]:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho v_r)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} + \frac{\rho v_r}{r} = 0; \quad (1)$$

$$\rho \frac{dv_r}{dt} = \frac{\partial \sigma_{rr}}{\partial r} + \frac{\partial D_{rz}}{\partial z} + \frac{2D_{rr} + D_{zz}}{r},$$

$$\rho \frac{dv_z}{dt} = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial D_{rz}}{\partial r} + \frac{D_{rz}}{r}; \quad (2)$$

$$\rho \frac{de}{dt} = \sigma_{rr} \dot{\varepsilon}_{rr} + \sigma_{zz} \dot{\varepsilon}_{zz} + \sigma_{\theta\theta} \dot{\varepsilon}_{\theta\theta} + 2\sigma_{rz} \dot{\varepsilon}_{rz}; \quad (3)$$

$$p = p(\rho, e); \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = -pg_{ij} + D_{ij}; \quad (5)$$

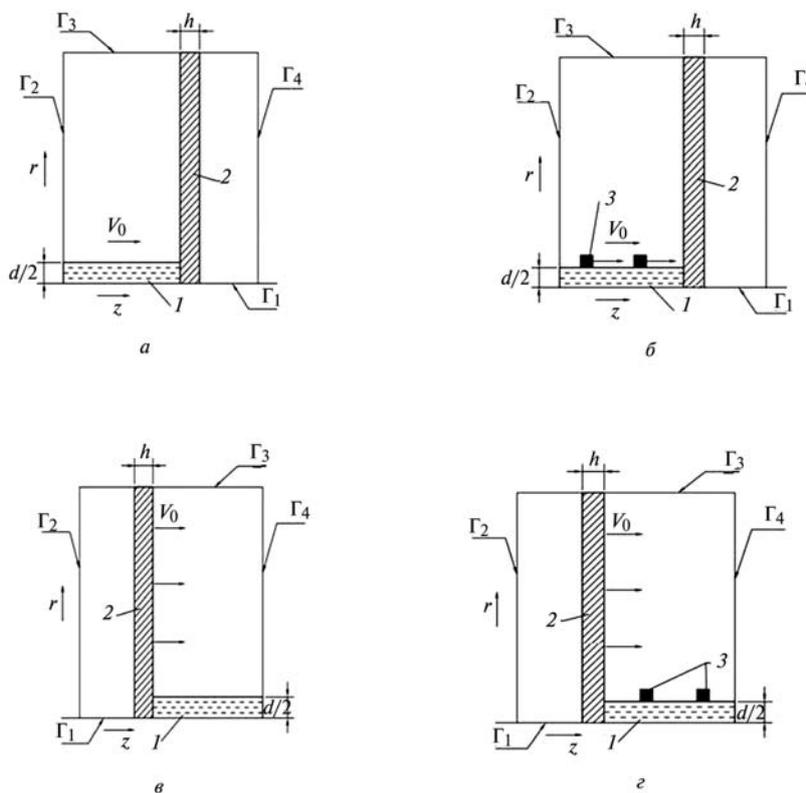


Рис. 1. Расчетные схемы ГР (а, в) и ГАР (б, г):

а, б — первая стратегия расчета; в, г — вторая стратегия расчета; 1 — струя; 2 — обрабатываемая деталь; 3 — частицы абразива; Г1, Г2, Г3, Г4 — границы расчетной области

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_{rr} &= \frac{\partial v_r}{\partial r}, \dot{\epsilon}_{\theta\theta} = \frac{v_r}{r}, \dot{\epsilon}_{zz} = \frac{\partial v_z}{\partial z}, \\ \dot{\epsilon}_{rz} &= \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}, \dot{\epsilon}_{r\theta} = \dot{\epsilon}_{z\theta} = 0; \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{DD_{rr}}{Dt} &= 2G \left(\dot{\epsilon}_{rr} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \right), \frac{DD_{zz}}{Dt} = 2G \left(\dot{\epsilon}_{zz} + \frac{1}{3\rho} \cdot \frac{d\rho}{dt} \right), \\ \frac{DD_{rz}}{Dt} &= G \dot{\epsilon}_{rz}; \end{aligned} \quad (7)$$

$$f = 2 \left(D_{rr}^2 + D_{rz}^2 + D_{zz}^2 + D_{rr} D_{zz} \right) \leq \frac{2}{3} Y^2. \quad (8)$$

Здесь ρ — плотность; p — давление; e — удельная внутренняя энергия; t — текущее время; r, z — радиальная и осевая координаты; v_r, v_z — компоненты вектора скорости; g_{ij} — метрические коэффициенты основного базиса выбранной системы координат, причем $i, j = r, \theta, z$; $\sigma_{rr}, \sigma_{zz}, \sigma_{\theta\theta}$ — нормальные напряжения в радиальном, осевом и тангенциальном направлениях; σ_{rz} — касательные напряжения; D_{ij} — компо-

ненты девиатора напряжений; — компоненты тензора скоростей деформаций; $D(\dots)/Dt$ — производная Яуманна; G — модуль сдвига; Y — динамический предел текучести среды.

В приведенной системе уравнений в порядке следования представлены законы сохранения массы (1), импульса (2) и энергии (3), в общем виде уравнения состояния взаимодействия взаимодействующих сред (4), взаимосвязь компонентов тензора полных напряжений с шаровой и девиаторной составляющими (5), кинематические соотношения (6), физические соотношения в виде закона Гука в дифференциальной форме (7) и условия пластического течения Мизеса (8).

В начальный момент времени в соответствии с выбранной стратегией расчета задавалась либо скорость струи и частиц абразива, либо скорость преграды. Исходное состояние преграды соответствовало состоянию невозмущенной среды. В качестве граничных условий использовались следующие: в области

контактного взаимодействия струи с преградой накладывались ограничения на скорость индивидуальных точек в направлении оси Oz в соответствии с условиями непроницаемости материала

$$v_z^{стр} = v_z^{пр},$$

а также на напряженное состояние, реализующегося в этих точках в соответствии с третьим законом Ньютона

$$p_{ni}^{стр} = \sigma_{ij}^{пр} n^i,$$

где n^i — вектор единичной нормали к поверхности преграды.

При формулировке граничных условий на оси симметрии (ось Oz) необходимо учитывать, что при $r = 0$ частицы среды движутся только в осевом направлении ($v_z = 0$), а осевые ускорения этих частиц должны быть ограничены. Из уравнений движения следует, что это может быть реализовано только при отсутствии касательных напряжений на оси симметрии ($\sigma_{rz} = 0$) [4]. При решении исходной системы уравнений на неподвижной сетке область интегрирования ограничена (см. рис. 1): снизу осью симметрии (Γ_1); слева, сверху, справа — открытыми поверхностями ($\Gamma_2, \Gamma_3, \Gamma_4$), через которые среда может вытекать или втекать.

Уравнения состояния для металлов использовали в форме линейной (linear) баротропной зависимости давления от плотности $p = K(\rho/\rho_0 - 1)$. Здесь ρ_0 — начальная плот-

ность. Другие физико-механические характеристики материалов представлены в таблице. Уравнение состояния воды принималось в виде полиномиальной (polynomial) зависимости давления от плотности:

$$p = A_1\mu + A_2\mu^2 + A_3\mu^3 + (B_0 + B_1\mu)\rho_0 e \text{ при } \mu \leq 0;$$

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

где $\mu = \rho/\rho_0 - 1$; $\rho, \rho_0 = 1 \text{ г/см}^3$ — текущая и начальная плотности соответственно. Коэффициенты уравнения состояния воды принимали следующие числовые значения: $A_1 = 2,2 \text{ ГПа}$, $A_2 = 9,54 \text{ ГПа}$, $A_3 = 14,57 \text{ ГПа}$, $B_0 = B_1 = 0,28$, $T_1 = 2,2 \text{ ГПа}$, $T_2 = 0$.

В качестве критерия разрушения материала преграды использовался деформационный критерий вида [6]

$$\varepsilon_p \leq \varepsilon_p^*,$$

где $\varepsilon_p = \sqrt{2/3} \sqrt{\varepsilon_p^j \varepsilon_p^j}$ — интенсивность пластических деформаций; ε_p^j — пластические составляющие компонент тензора деформаций; ε_p^* — предельная (критическая) пластическая деформация.

На рисунках 2—5 представлены этапы ожидаемых механизмов разрушения алюминиевой преграды (АМг6) толщиной $h = 5 \text{ мм}$, полученные расчетным путем, с использованием деформационного критерия разрушения. Вне зависимости от используемой стратегии, скорость струи или преграды составляла $V_0 = 0,8 \text{ км/с}$, диаметр частиц абразива $0,4 \text{ мкм}$.

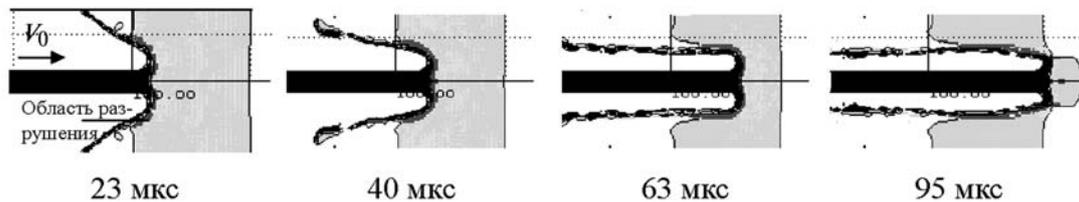


Рис. 2. Этапы проникновения высокоскоростной струи воды в алюминиевую преграду по первой стратегии расчета

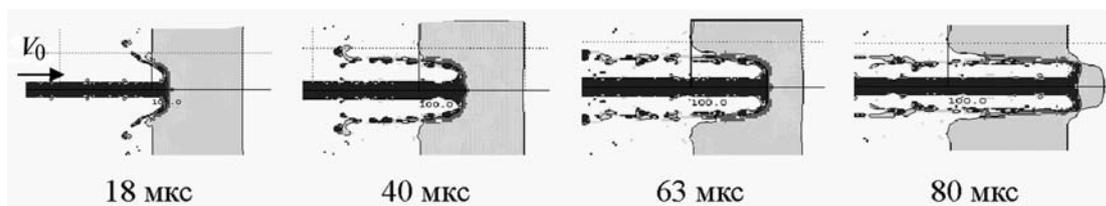


Рис. 3. Этапы проникновения высокоскоростной струи воды и частиц абразива в алюминиевую преграду по первой стратегии расчета

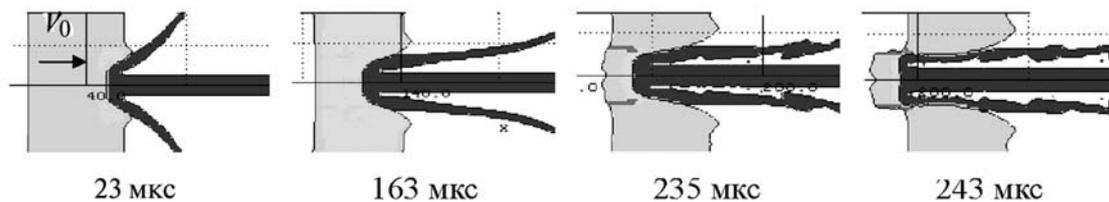


Рис. 4. Этапы проникновения высокоскоростной струи воды в алюминиевую преграду по второй стратегии расчета

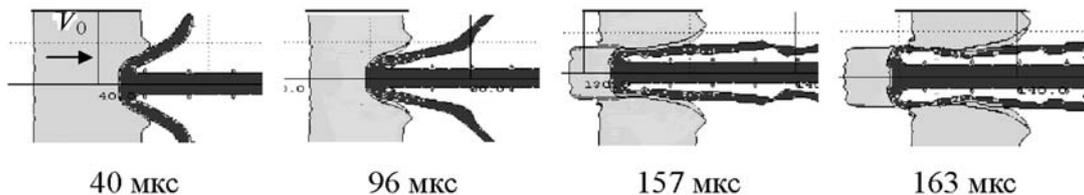


Рис. 5. Этапы проникновения высокоскоростной струи воды и частиц абразива в алюминиевую преграду по второй стратегии расчета

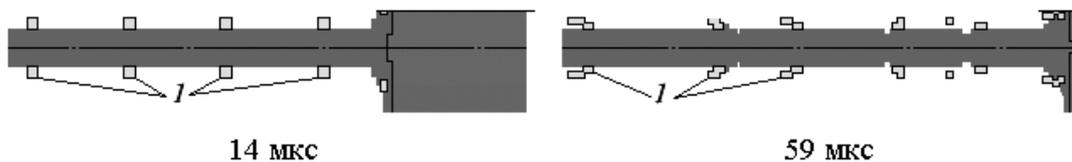


Рис. 6. Начальное и последующие конфигурации частиц абразива (позиция I)

Сравнивая представленные рисунки необходимо отметить следующее. Несмотря на качественное совпадение регистрируемых процессов, наблюдается их количественное различие по времени. Это связано со спецификой используемых расчетных стратегий и требует дополнительного объяснения. Кроме того, наблюдается более высокая скорость резки ГАР по сравнению с ГР. Отмеченная особенность наиболее ярко иллюстрируется при использовании второй расчетной стратегии, что, очевидно, связано с эффектом «размазывания» частиц абразива на эйлеровой сетке (рис. 6).

Выводы

Разработаны физико-математическая модель и стратегии расчета ГР или ГАР, основанные на использовании идеальноупругопластической модели взаимодействующих сред и прямого или обращенного движения струи по отношению к обрабатываемой детали в зависимости от используемого метода обработки.

Апробированы критические условия разрушения материала детали из алюминиевого сплава АМгб в условиях высокоскоростного воздействия гидроабразивной струи.

Показаны возможности разработанного подхода и определенные преимущества ГАР по отношению к ГР в плане скорости обработки поверхности.

Необходимо отметить, что представленная работа является лишь начальным этапом для решения более сложных задач, связанных с оптимизацией технологических параметров ГАР, в частности на характер поведения частиц абразива в фокусирующем сопле.

Литература

1. Ультразвуковая технология получения микросуспензий / О.Е. Балашов, А.А. Барзов, А.Л. Галиновский и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. 352 с.
2. Тарасов В.А., Полухин А.Н. Оценка геометрических параметров формируемой поверхности при гидроабразивной резке // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2012. № 1 (86). С. 107–116.
3. Физика взрыва / Под ред. Л.П. Орленко. В 2 т. Т. 2. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 656 с.
4. Бабкин А.В., Колтаков В.И., Охитин В.Н., Селиванов В.В. Численные методы в задачах физики быстротекучих процессов. В 3 т. Т. 3. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. 520 с.
5. Теоретические и экспериментальные исследования высокоскоростного взаимодействия тел / под ред. А.В. Герасимова. Томск: Изд-во Томского университета, 2007. 572 с.
6. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 420 с.

Статья поступила в редакцию 02.05.2012