

**ТАРАСОВ**

Владимир Алексеевич
доктор технических наук,
профессор, заведующий
кафедрой «Технологии
ракетно-космического
машиностроения»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**ГАЛИНОВСКИЙ**

Андрей Леонидович
кандидат технических наук,
профессор кафедры
«Технологии
ракетно-космического
машиностроения»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

**ЕЛФИМОВ**

Владимир Михайлович
аспирант кафедры
«Технологии
ракетно-космического
машиностроения»
(МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Минимизация технологической себестоимости гидроабразивного резания с учетом стоимостных и технологических параметров процесса обработки

В.А. Тарасов, А.Л. Галиновский, В.М. Елфимов

В статье рассмотрено решение проблемы повышения технико-экономической эффективности гидроабразивного резания материалов путем оптимизации технологических параметров обработки на базе построения и анализа математической модели удельной технологической себестоимости процесса формообразования. Созданное методическое обеспечение оптимизации технологических параметров гидроабразивной резки позволит снизить удельную технологическую себестоимость раскроя листовых материалов на предприятиях машиностроительного комплекса.

Ключевые слова: гидроабразивное резание, оптимизация, технологические параметры, расход абразива, эффективность технологии

The article considers a way to increase technical and economic efficiency of hydroabrasive material cutting process by means of optimization of technological process parameters based on construction and analysis of a mathematical model of specific technological cost price of shaping process. The developed methodical maintenance for optimization of hydroabrasive cutting process parameters permits to reduce a specific technological cost price of sheet material cutting at machine-building enterprises.

Keywords: hydroabrasive cutting, optimization, technological parameters, abrasive consumption, efficiency of technology.

Одним из эффективных способов обработки материалов в современном машиностроении является интенсивно развивающаяся технология гидрорезания и гидроочистки сверхзвуковой жидкостной или гидроабразивной струей. Эти технологии, обладая широкими функционально-технологическими возможностями, уверенно вошли в арсенал современных высокоэффективных способов физико-технической обработки различных материалов. В последние годы в России наблюдается интенсивный рост парка технологического гидрорежущего оборудования в различных отраслях промышленности, расширение сферы его рационального применения. Данное обстоятельство обусловлено рядом преимуществ технологии гидроабразивного резания (ГАР), в особенности при обработке композиционных и неметаллических материалов. Анализ показал, что наиболее эффективно использование гидроабразивного резания при сложно-контурном раскрое листовых заготовок из различных материалов, обладающих

широким разбросом физико-механических характеристик.

Основное внимание на начальном этапе становления технологии ГАР уделялось созданию надежных насосных систем для получения сверхвысоких гидродавлений (300...400 МПа), обеспечивающих формирование высокоэнергетической компактной гидроабразивной струи — специфического режущего инструмента. Параллельно исследовались технологические возможности метода, изучались особенности процесса взаимодействия гидроабразивной струи с обрабатываемым материалом, оценивалась его производительность, как основной показатель эффективности ГАР [1—3].

В дальнейшем получили свое развитие математические модели, связывающие исходные физико-энергетические параметры гидроабразивной струи с выходными технологическими показателями процесса формообразования: точностью и качеством обработанной поверхности [4, 5]. Осуществлялась оптимизация параметров ГАР по критерию производительности и проводились оценки стоимостных показателей процесса формообразования, совершенствовались системы создания сверхвысоких давлений и элементы струеформирующего тракта [6]. В последние годы значительное внимание уделяется программно-математическому обеспечению и числовому управлению процессом ГАР, созданию баз данных по обрабатываемости различных материалов, развитию элементов систем автоматизированного проектирования технологических операций и их информационно-диагностическому оснащению.

Значительный вклад в разработку и развитие конструкторско-технологического обеспечения процесса ГАР внесли отечественные и зарубежные ученые: В.Ф. Бабанин, Г.В. Барсуков, В.С. Гуенко, Е.Н. Петухов, В.С. Степанов, Р.А. Тихомиров, И.И. Шапиро, Д. Агова, А. Момбер, Р. Ковачевич и другие.

Однако комплексных исследований, ставящих своей основной целью структурный анализ и оптимизацию технологических параметров процесса ГАР по критерию минимума его технологической себестоимости, как важней-

шей характеристики технико-экономической эффективности, не проводилось. Это объясняется, в первую очередь, достаточно сложным функциональным характером зависимости производительности ГАР от основных исходных технологических условий обработки: рабочего давления струи, расходов воды и абразива и т. д.

В связи с этим, построение и анализ модели взаимосвязи функционально-технологических и стоимостных показателей процесса гидроабразивного резания, позволяющей дать объективную оценку его себестоимости и осуществить целенаправленную оптимизацию технологических параметров обработки, является актуальной научно-практической задачей, решение которой имеет существенное значение для повышения конкурентоспособности этой технологии в различных отраслях машиностроения.

Выбор приоритетной цели исследования, связанной с разработкой технико-экономической модели процесса ГАР и оптимизацией технологических режимов по критерию минимальной удельной себестоимости контурной обработки листовых материалов и конструкций, был обоснован результатами применения метода экспертных оценок. Было установлено, что ожидаемая результативность технико-экономической оптимизации технологических параметров ГАР, по мнению экспертов, превышает по значимости другие направления совершенствования данной операционной технологии.

В состав анкеты экспертов были включены такие критерии, как: потенциальная возможность реализации решения, ожидаемая технико-экономическая эффективность, общие затраты на реализацию решения, возможное повышение производительности процесса, ожидаемое улучшение качества обработки, широта сферы применения решения, наличие подобного решения, степень изученности слагаемых решения, общая оценка перспективности решения.

Использование числовых показателей мнений экспертов позволило провести статистическую обработку результатов анкетирования и определить среднее значение и дисперсию мнений о значимости развития того или иного

направления повышения эффективности технологии ГАР. Кроме того, оценивался инновационный потенциал анализируемого решения в виде отношения уровня его ожидаемой эффективности к величине затрат на реализацию решения.

Такой подход позволил с единых позиций осуществить ранжирование значимости анализируемых направлений развития технологии ГАР. Полученные результаты экспертно-аналитического анализа представлены в виде диаграммы (рис. 1), где были учтены семь основных направлений повышения эффективности технологии ГАР: 1) повышение рабочего давления струи; 2) улучшение режущих свойств абразива; 3) увеличение диаметра гидросопла (струи); 4) совершенствование конфигурации гидросопла; 5) оптимизация кинематики обработки; 6) применение дополнительных воздействий; 7) комплексная оптимизация параметров.

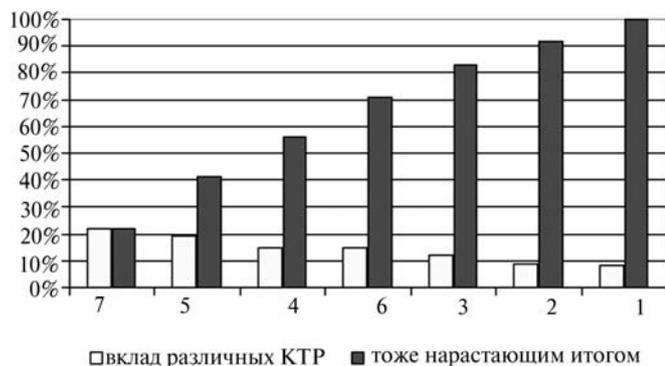


Рис. 1. Оценка вклада различных конструкторско-технологических решений в обеспечение итоговой результативности операционных технологий ГАР

Важным этапом повышения технико-экономической эффективности технологий ГАР был анализ структуры затрат на обслуживание гидроструйного оборудования ведущих фирм мира KMT Waterjet и Flow Systems, который показал существенную значимость расходов, связанных с изнашиванием элементов струеформирующего тракта. Кроме того, данные, приведенные в табл. 1, показывают, что затраты на гранатовый абразив и струеформирующие сопловые элементы составляют ~75% общей величины затрат. Это обстоятельство указывает на то, что оптимизация расходов на абразив-

ный материал является важнейшим резервом повышения технико-экономической эффективности технологии ГАР.

Таблица 1

Обобщенная структура затрат на обеспечение процесса ГАР

Наименование статьи затрат	Электроэнергия	Гранатовый абразив	Гидросопло	Фокусирующее сопло	Уплотнители
Удельная величина затрат, %	13	60	2	13	12

Разрабатывая модель оптимизации ГАР по стоимостным параметрам процесса обработки, в первую очередь технологической себестоимости, необходимым является представление о достаточно сложных взаимосвязях между оптимизируемыми физико-технологическими и стоимостными параметрами ГАР, а также масс-энергетических превращениях в зоне обработки.

Исследование массопереноса и энергетических превращений в процессе ГАР позволило доказать несовпадение оптимальных значений концентрации абразива в абразивно-жидкостной струе, соответствующих наибольшей производительности и наименьшей технологической себестоимости ГАР листовых материалов и конструкций.

Для условий ГАР было проведено экспериментальное исследование эрозионного изнашивания обрабатываемого материала и материала струеформирующего сопла. В результате исследований был установлен характер изнашивания струеформирующего сопла и показан пропорциональный характер связи интенсивностей эрозионного изнашивания обрабатываемого материала $J_{ом}$ и материала фокусирующего сопла $J_{фс}$ с концентрацией абразива c . При этом для различных исследуемых материалов коэффициент корреляции между $J_{фс}$ и $J_{ом}$ составил $r = 0,95—0,97$. Данное обстоятельство обеспечило снижение трудоемкости в повышении эффективности процедуры оптимизации концентрации абразива по удельной себестоимости обработки.

На базе использования подхода к анализу свободных струй [7, 8] была получена обоб-

щающая зависимость между интенсивностью J эрозионного изнашивания материалов под действием потока абразива и концентрацией абразива, согласующаяся с известными результатами исследований в области ГАР

$$J = K_T c \frac{V_{0в}^n}{(k_n + c)^n},$$

которая обосновывает наличие максимальной интенсивности эрозионного изнашивания

$$J_{\max} = K_T \left(\frac{V_{0в}}{n}\right)^n \left(\frac{n-1}{k_n}\right)^{n-1}$$

при физически оптимальной концентрации абразива

$$c_{\text{opt}}^{\Phi} = \frac{k_n}{n-1}, \quad (1)$$

где K_T — коэффициент пропорциональности, зависящий от прочности и плотности эродирующего материала; k_n — эмпирический коэффициент, учитывающий результативность применения абразива, его режущих свойств, формы и размера, прочности отдельных зерен и их твердости, а также степень коллективного участия частиц и расклинивающее действие воды при абразивном нагружении эродирующей поверхности; $V_{0в}$ — скорость воды в случае отсутствия подачи абразива в струю, $n = 2, 3$, в соответствии с работами Ю.Е. Еруховича [6] и К.П. Станюковича [7].

Основываясь на результатах экономического анализа эффективности обработки материалов резанием, стоимостное выражение затрат C_T на обеспечение ГАР при номинальных рабочих давлениях и расходе воды можно представить в следующем виде:

$$C_T = \sum_{i=1}^4 C_i + \sum_{j=5}^{10} C_j + C_{\text{сн}} + C_a, \quad (2)$$

где C_1 — затраты на внутрицеховое транспортирование; C_2 — затраты на услуги сторонних организаций; C_3 — внепроизводственные расходы; C_4 — заработные платы станочника (основная и дополнительная с начислениями), рабочих и инженеров, занятых обеспечением и обслуживанием основного технологического и программно-вычислительного оборудования;

C_5 — затраты на электроэнергию; C_6 — затраты на потребляемую воду; C_7 — затраты на материалы, расходуемые на содержание станка (масло, уплотнения и т. д.); C_8 — расходы на амортизацию станка и оборудования; C_9 — расходы на текущий и планово-предварительный ремонт оборудования; C_{10} — расходы на приобретение и замену гидросопла; $C_{\text{сн}}$ — расходы на приобретение и замену фокусирующего сопла; C_a — расходы на абразивный материал.

На основе анализа общей структуры затрат на ГАР, было получено математическое выражение для удельной технологической себестоимости C_T ГАР листовых материалов и конструкций как функции от стоимостных и технологических параметров процесса, которое выступает в качестве целевой функции при оптимизации режимов обработки:

$$C_T = \frac{\dot{\Pi}_{\text{вн}} + J_{\text{фс}} \bar{\Pi}_{\text{фс}} + \dot{m}_в c \Pi_a}{J_{\text{ом}}}, \quad (3)$$

здесь $\dot{\Pi}_{\text{вн}}$ — стоимость функционирования гидротехнологического комплекса в единицу времени; $\bar{\Pi}_{\text{фс}} = \Pi_{\text{фс}} / m_{\text{кр}}$; $\Pi_{\text{фс}}$ — стоимость одного фокусирующего сопла; $m_{\text{кр}}$ — критическая масса износа фокусирующего сопла, которая определяет потерю режущих свойств гидроабразивной струей; $\dot{m}_в$ — массовый расход воды; Π_a — стоимость единицы массы абразива.

Если допустить, что за период времени $T_{\text{фс}}$, равный стойкости фокусирующего сопла, изменениями $\dot{\Pi}_{\text{вн}}$, $J_{\text{фс}}$, $J_{\text{ом}}$ можно пренебречь, а подача абразива и воды равномерна, то выражение (2) можно представить в интегральном виде:

$$C_T^{\text{и}} = \frac{T_{\text{фс}} (\dot{\Pi}_{\text{вн}} + \dot{m}_в c \Pi_a / (1-c)) + \Pi_{\text{фс}}}{T_{\text{фс}} J_{\text{ом}}}. \quad (4)$$

здесь $C_T^{\text{и}}$ — стоимостное выражение затрат за время $T_{\text{фс}}$ на удаление с заготовки массы обрабатываемого материала $\Delta M_T = J_{\text{ом}} T_{\text{фс}}$, где $T_{\text{фс}}$ — стойкость (с, мин, ч) фокусирующего сопла.

Полученные выражения (3) и (4) позволяют оценить стоимостную эффективность процесса ГАР и представляют собой математические мо-

дели связи между основными входными ($\dot{\Pi}_{\text{вн}}$, $\Pi_{\text{фс}}$, c , $V_{0\text{в}}$, Π_a) и выходными ($J_{\text{фс}}$ и $J_{\text{ом}}$) технико-экономическими и технологическими параметрами обработки. Причем, в неявном виде они отражают влияние рабочего давления ($V_{0\text{в}} = \sqrt{2p_H / \rho}$) и расхода воды $\dot{m}_\text{в}$ на стоимостную оценку производительности ГАР.

Согласно (1) необходимое условие стоимостной оптимизации процесса ГАР с учетом принятых допущений по параметру c (массовой концентрации абразива) будет определяться соотношением

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_{\text{ом}}}{\partial c} (\dot{\Pi}_{\text{вн}} + J_{\text{фс}} \bar{\Pi}_{\text{фс}} + \dot{m}_\text{в} c \Pi_a) &= \\ = \frac{\partial J_{\text{фс}}}{\partial c} J_{\text{ом}} \bar{\Pi}_{\text{фс}} + J_{\text{ом}} \dot{m}_\text{в} \Pi_a. \end{aligned} \quad (5)$$

Учитывая в этом уравнении описанную выше зависимость между интенсивностью J эрозионного изнашивания материалов под действием потока абразива и концентрацией абразива, можно приступить к поиску экономически оптимальной концентрации абразива $c_{\text{опт}}$.

Сделав допущение о подобии законов эрозионного изнашивания обрабатываемого материала и материала сопла, учитывая теоретическую обобщающую зависимость между интенсивностью J эрозионного изнашивания материалов под действием потока абразива и концентрацией абразива, а также проведя ряд математических преобразований с уравнением (5), получим математическое выражение для оптимальной концентрации абразива в абразивно-жидкостной струе, обеспечивающей минимум технологической себестоимости гидроабразивной резки листовых материалов и конструкций и учитывающей стоимостные и технологические параметры процесса обработки:

$$\begin{aligned} c_{\text{опт}}^3 &= -\frac{(n-1)\dot{\Pi}_{\text{вн}}}{2n\Pi_a\dot{m}_\text{в}} + \\ + \sqrt{\left[\frac{(n-1)\dot{\Pi}_{\text{вн}}}{2n\Pi_a\dot{m}_\text{в}}\right]^2 + \frac{k_i\dot{\Pi}_{\text{вн}}}{n\Pi_a\dot{m}_\text{в}}} \end{aligned} \quad (6)$$

Определение необходимых констант функции интенсивности изнашивания возможно на базе проведения пробных экспериментов. При этом по числу констант в законе (6) достаточно двух пробных экспериментов, которые следует провести по схеме, представленной на рис. 2.

Очевидно, что массу обрабатываемого материала, удаляемого при ГАР, можно оценить по формуле:

$$M_{\text{ом}}^3 = \chi d_c h \rho_{\text{ом}} S t. \quad (7)$$

здесь χ — коэффициент; d_c — диаметр струи; h — глубина прорезаемой канавки; $\rho_{\text{ом}}$ — плотность обрабатываемого материала; t — время обработки; S — скорость подачи. При этом ширина канавки b слабо зависит от концентрации c и пропорциональна диаметру струи d_c , т. е.

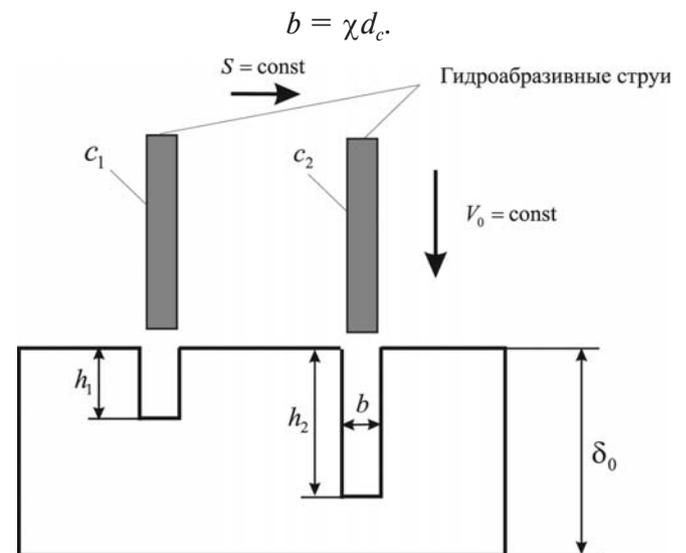


Рис. 2. Схема проведения пробных экспериментов при уточнении формулы эрозионного изнашивания обрабатываемого материала:

- c_1 и c_2 — минимальная и максимальная концентрации абразива соответственно;
- δ_0 — толщина испытываемого образца; S — скорость подачи; b — ширина канавки;
- V_0 — скорость движения абразивно-жидкостной струи; h — глубина прорезаемой канавки

Учитывая связь между интенсивностью J эрозионного изнашивания материалов под действием потока абразива и концентрацией абразива, получим уравнение:

$$K_T c \frac{V_{0\text{в}}^n}{(k_i + c)^n} = J_{\text{ом}} = \frac{M_{\text{ом}}^3}{t} = \chi d_c h \rho_{\text{ом}} S. \quad (8)$$

Отсюда, используя эмпирические значения h_1 и h_2 , соответствующие глубине канавки прорезанной абразивно-жидкостной струей при минимальной c_1 и максимальной c_2 концентрации абразива, получим уравнение для определения коэффициента k_n :

$$\frac{M_{\text{ом2}}^3}{M_{\text{ом1}}^3} = \frac{h_2}{h_1} = \left(\frac{k_n + c_1}{k_n + c_2} \right)^n \quad (9)$$

здесь в соответствии с результатами теоретического обобщения показатель n изменяется в интервале $2 \leq n \leq 3$ [6].

Учитывая выполненные преобразования, соотношения для расчета констант примут вид

$$\left\{ \begin{aligned} k_n &= \frac{c_2 \left(\frac{h_2 c_1}{h_1 c_2} \right)^{\frac{1}{n}} - c_1}{1 - \left(\frac{h_2 c_1}{h_1 c_2} \right)^{\frac{1}{n}}}; \\ K_T &= \frac{(k_n + c)^n \chi d_c h_2 \rho_{\text{ом}} S}{c_2 V_{0\text{в}}^n}. \end{aligned} \right. \quad (10)$$

Таким образом, проведя два эксперимента (см. рис. 2), можно определить закон интенсивности $J_{\text{ом}}$ как функцию концентрации абразива c , что необходимо для оптимизации концентрации по технико-экономическому показателю.

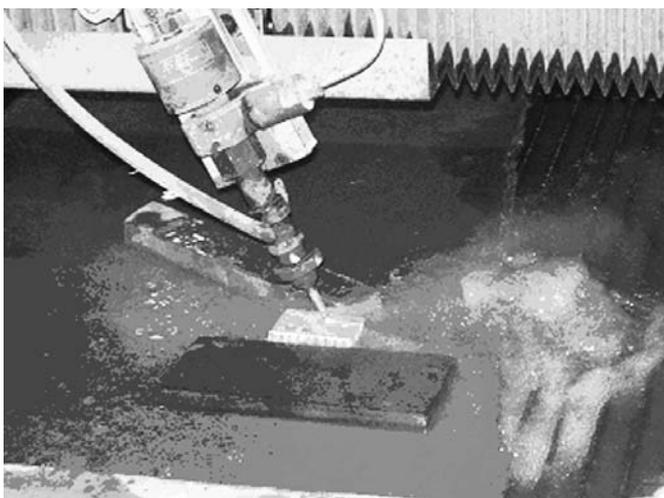
В табл. 2 представлены сопоставительные данные об оптимальной концентрации абразива в абразивно-жидкостной струе, обеспечивающей минимум технологической себестоимости ГАР. Представленная информация о концентрации абразива получена в результате теоретических расчетов по выражению (6), из рекомендуемых данных фирмы производителя гидрорежущего оборудования KMT WaterJet и данных, используемых предприятием ООО «Старт-РЛ» г. Дмитров, специализирующемся на гидроабразивной резке материалов. Необходимо отметить, что рекомендации предприятия ООО «Старт-РЛ» сформированы исключительно на гипотетических предположениях об эффективности того или иного режима резания (концентрации абразива).

Следует отметить, что информационная база данных предприятия ООО «Старт-РЛ» и фирмы KMT WaterJet весьма ограничена по количеству рассматриваемых материалов, чем объясняются пропуски значений концентрации в табл. 2. Предварительные расчеты показали, что в случае использования данных об оптимальном расходе абразива в процессе ГАР материалов при загрузке гидрорежущего оборудования в течении рабочей смены пять дней в неделю, экономия абразивного материала может составить до 500 кг в месяц. Принимая в расчет стоимость 1000 кг абразива 600 евро экономи-

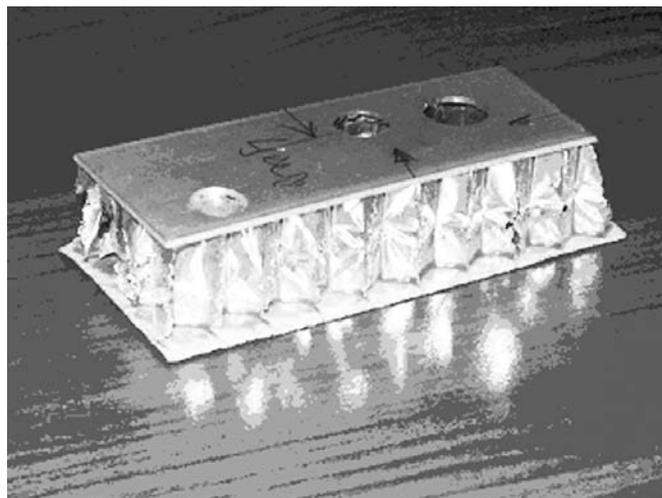
Таблица 2

Результаты оценки параметров закона эрозии обрабатываемых материалов и технологические режимы при ГАР

Материал	Скорость подачи, S , мм/с	Расход абразива (теоретический расчет) $c_{\text{опт}}$, кг/мин	Рекомендации ООО «Старт-РЛ» по расходу абразива, кг/мин	Рекомендации фирмы KMT WaterJet по расходу абразива, кг/мин	Расхождение ~ 20%
Сталь 45	2	0,188	0,2...0,25	0,22	
Сплав ВТ-4	2	0,178	0,2	0,2	
Сплав АМг6	5	0,148	—	0,125	
Стеклопластик	20	0,075	0,1	0,13	
Текстолит	40	0,186	—	—	
Полиуретан	40	0,098	0,1...0,15	—	



a



б

Рис. 3. Процесс ГАР сотовой панели (*a*) и качество реза при отклонении струеформирующей головки от вертикального положения (*б*)

ческий эффект составит порядка 12 000 рублей в месяц.

Кроме того, необходимо отметить, что прежде чем начинать внедрение предложенной методики оптимизации, обеспечивающей минимум технологической себестоимости ГАР листовых материалов и конструкций, необходимо рассмотреть и другие вопросы технической оптимизации, без учета которых данная задача не будет иметь должного прикладного значения. Речь, в частности, идет о важном классе плоских (листовых) конструкций, требующих сокращения затрат на контурную резку — многослойных панелей с сотовым наполнителем, которые отличаются неоднородностью толщины и требуют реализации скачкообразного изменения подачи (рис. 3, *б*).

Для повышения производительности и экономичности ГАР предложено отклонить положение струеформирующей головки на угол α (рис. 3, *a* и рис. 4) от вертикального направления. При этом помимо роста технико-экономических показателей, обеспечивается не смятие сотового наполнителя и высокое качество реза.

В заключение отметим, что созданное методическое и программно-математическое обеспечение оптимизации технологических параметров ГАР позволяет снизить удельную технологическую себестоимость раскроя листовых материалов на предприятиях машиностроительного комплекса.

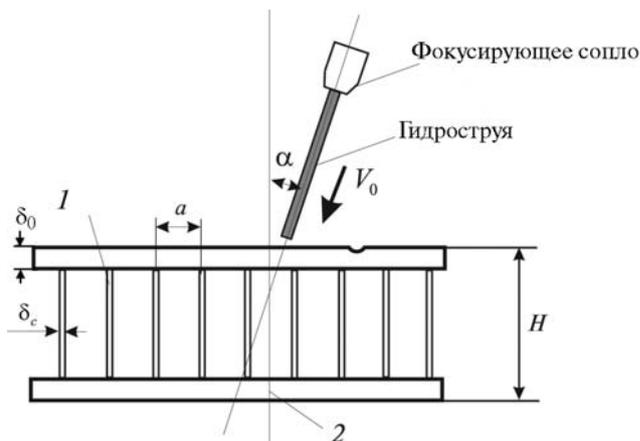


Рис. 4. Схема оптимизации угла α при ГАР сотовых панелей:

- 1 — сотовый наполнитель (техническая фольга);
- 2 — алюминиевый облицовочный лист;
- a — расстояния между сотами наполнителя;
- δ_0 — толщина облицовочного листа; H — толщина пакета; δ_c — толщина сотового наполнителя;
- α — угол взаимодействия гидроструи с поверхностью облицовочного листа;
- V_0 — скорость движения гидроструи

Литература

1. Билик Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. М.: ГНТИМЛ, 1960. 198 с.
2. Тихомиров Р.А., Бабин В.Ф., Петухов Е.Н. Гидрорезание судостроительных материалов. Л.: Судостроение, 1987. 164 с.
3. Шманев В.А., Шулепов А.П., Мещеряков А.В. Струйная гидроабразивная обработка деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1995. 350 с.

4. Степанов Ю.С., Барсуков Г.В. Современные технологические процессы механического и гидроструйного раскроя технических тканей. М.: Машиностроение, 2004. 239 с.

5. Степанов Ю.С., Бурнашов М.А., Головин К.А. Прогрессивные технологии гидроструйного резания материалов. Тула: Изд-во ТулГУ, 2009. 318 с.

6. Ерухимович Ю.Э. Математическое моделирование и совершенствование метода расчета эффективности процесса резания горных пород гидроабразивным инструментом: Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук: 05.05.06 / Ю.Э. Ерухимович. Тула, 1999.

7. Станюкович К.П. Неустановившиеся движения сплошной среды / М.: Изд-во Наука. 1971. 854 с.

8. Лаврентьев М.А., Шабат Б.В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. М.: Наука, 1973. 416 с.

9. Барзов А.А., Галиновский А.Л., Елфимов В.М., Сальников С.К. Анализ влияния кинематического фактора ультразвука на эффективность гидрообработки материалов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2010. М.: Изд-во СПбГПУ. С. 115–124.

Статья поступила в редакцию 04.03.2011 г.

**В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МГТУ им. Н.Э. БАУМАНА
вышел в свет учебник
под общей редакцией А.М. Архарова и И.К. Буткевича
«Машины низкотемпературной техники.
Криогенные машины и инструменты»**

Приведены методы расчета и конструирования криогенных машин, безмашинных криогенераторов и криоинструментов, наиболее широко применяемых в низкотемпературной технике.

Рассмотрены поршневые и лопастные машины, предназначенные как для криогенерации (детандеры, криогенные газовые машины), так и для циркуляции криоагента (насосы), а также криогенные аппараты, реализующие струйный, вихревой, пульсационный, волновой и магнитокалорический эффекты при получении холода. Приведены расчеты и конструкции специфических криогенераторов и криоинструментов, используемых в криохирургии. Рассмотрены процессы, происходящие в машинах и аппаратах, работающих в двухфазной области параметров состояния криоагентов.

Содержание учебника соответствует курсу лекций, который авторы читают в МГТУ им. Н.Э. Баумана. Для студентов, инженеров, магистров, аспирантов и специалистов.

По вопросам приобретения обращаться:
Тел.: (499) 263-60-45, тел./факс: 261-45-97