

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СВЕРХЗВУКОВОЙ СТРУИ НА ГЕОМЕТРИЮ ОТВЕРСТИЯ, ВЫПЛАВЛЯЕМОГО В ПРЕГРАДЕ

Первышин А.Н., Блохин И.В.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

Во всех известных технологических применениях генераторов сверхзвуковых струй (ГСС) струя продуктов сгорания используется как средство транспортировки энергии продуктов сгорания к объекту воздействия, будь это сопло ракетного двигателя, разрезаемая преграда напыляемая, очищаемая поверхность или газоструйный теплообменник [1]. Однако в зависимости от решаемой задачи, условия транспортировки могут существенно меняться. В одних задачах максимальное значение приобретает концентрация кинетической и тепловой энергии на минимальной площади, в других - разделение этой энергии в некотором заранее заданном пространстве, иногда превалирующую роль играет дальнобойность струи или ее акустическая энергия.

Тепловой поток воздействуя на преграду от сверхзвуковой струи продуктов сгорания ГСС, в значительной степени определяет эффективность резки материалов.

Можно выделить характерные стадии этого воздействия:

- нагрев материала до заданной температуры;
- выплавление в материале отверстия при неподвижном источнике тепла.

Время нагрева, плавление отверстия в значительной степени определяется как процессами распространения тепла в материале так и концентрацией энергии в струе продуктов сгорания. Для сверхзвуковой струи можно выделить следующие основные особенности воздействия на технологический объект:

- выделяемое струей тепло концентрируется на малой, по сравнению с размерами изделия, площади;
- вне поверхности воздействия теплоотдача существенно меньше, чем в зоне воздействия.

Источник тепла может перемещаться либо в глубь, либо по поверхности изделия. Схема воздействия на преграду неподвижным источником тепла представлена на рис. 1. Струя, предварительно нагрев материал до температуры плавления, внедряется в вещество в направлении x , выплавляя за время $d\tau$ его поверхностный слой толщиной dx , непосредственно контактирующий с продуктами сгорания, образуя соответствующую лунку характерного диаметра d , а затем и отверстие. Лишь часть мощности продуктов сгорания идет на нагрев и плавление материала.

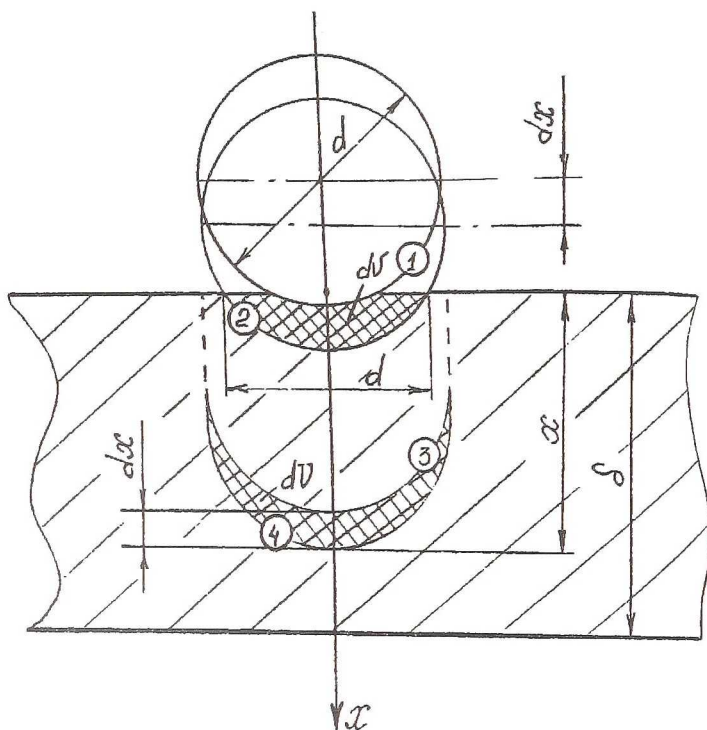


Рис. 1 Схема прожигания отверстия

Определение коэффициента теплоотдачи в столь сложных условиях не представляется возможным [2], поэтому часть целесообразно определить эмпирическим коэффициентом теплового воздействия:

$$K_{nl} = N_l / \psi_{nl} \psi_{\beta}^2 N, \quad (1)$$

где N_l - мощность продуктов сгорания, передаваемая материалам через поверхность активного взаимодействия F , аналогичную площади теплового пятна при нагреве;

ψ_{β}^2 - показатель энергетического совершенства рабочего процесса в камере ГСС;

$$\psi_{nl} = 1 - (T_{nl} - T_0) / (T_k - T_0) \quad (2)$$

- показатель возможности передачи тепловой энергии струи материалу за счет разности температур $(T_k - T_{nl})$;

N - полная мощность генератора при заданной температуре окружающей среды T_0 .

Допуская, что поступление энергии к материалу определяется конвективным теплообменом, причем плавление происходит только на некоторой части F_{nl} поверхности активного взаимодействия F , можно записать:

$$dQ_l = (\alpha_{nl} / \alpha_T)(F_{nl} / F) \psi_\beta^2 \psi_{nl} K_{nl} N d\tau \quad (3)$$

где dQ_l - часть тепловой энергии ГСС, идущей на плавление материала в течении времени $d\tau$,

α_{nl}, α_T - средние коэффициенты конвективного теплообмена на поверхностях и F соответственно.

С другой стороны энергия dQ идет на выплавление элементарного объема dv в области поверхности F_{nl} , что соответствует геометрическим затратам $\rho\gamma dv$, - здесь γ - удельная теплота плавления материала. Тогда уравнение сохранения энергии в дифференциальной форме при выплавлении отверстия неподвижным источником принимает вид:

$$(dv / d\tau) = (\alpha_{nl} / \alpha_T)(F_{nl} / F)(\psi_\beta^2 \psi_{nl} K_{nl} / \rho\gamma) N, \quad (4)$$

или в интегральной форме:

$$\Delta\tau = (\rho\gamma / \psi_\beta^2 \psi_{nl} N) I, \quad (5)$$

где

$$I = \int_{x_1}^{x_2} \frac{\alpha_T}{\alpha_{nl}} \frac{F}{F_{nl}} \frac{dv}{K_{nl}}. \quad (6)$$

При интегрировании (6) необходимо учитывать две стадии процесса выплавления отверстия (рис. 1):

- нестационарная ($F_{nl} = var$) в диапазоне $d/2 \geq x > 0$ - положения 1-2;
- квазиустановившаяся ($F_{nl} = const$) в диапазоне $\delta \geq x > (d/2)$, положение 3-4.

Характерный диаметр выплавляемой лунки d связан в общем случае с размером сопла генератора d_B , расстоянием до преграды h , степенью нерасчетности струи n_b и показателем изоэнтропы продуктов сгорания в сопле n [3,4].

Максимальное воздействие на технологический объект оказывает струя продуктов сгорания в области начального газодинамического ($0 < h < h_m$), газодинамического ($h_m < h < s$) и звукового ($s < h < h_{3g}$) участков. Для их оценки при резке тонких пластин ($\delta \leq d/2$) можно использовать результаты полученные для холодных струй [2,5], вводя соответствующие поправки на степень подогрева [6]. Однако при

резке более толстых пластин ($\delta > d/2$) на величину d оказывает влияние и их величина.

Для определения этого влияния, а также подтверждения предложенной формализации процесса выплавления отверстия, был поставлен эксперимент, схема которого приведена на рис. 2.

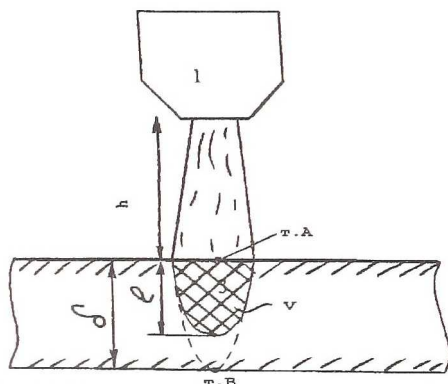


Рис.2. Прожигание отверстия

Газогенератор 1 располагается на расстоянии h , изменяемом в диапазоне 10...97 мм, от неподвижных пластин 2 толщиной $\delta=1,2...38$ мм, выполненных из различных материалов. После запуска генератора контролировалась температура точки А передней поверхности пластины расположенной на оси спереди продуктов сгорания 3, с помощью хА термопары и КСП-4. При достижении температуры

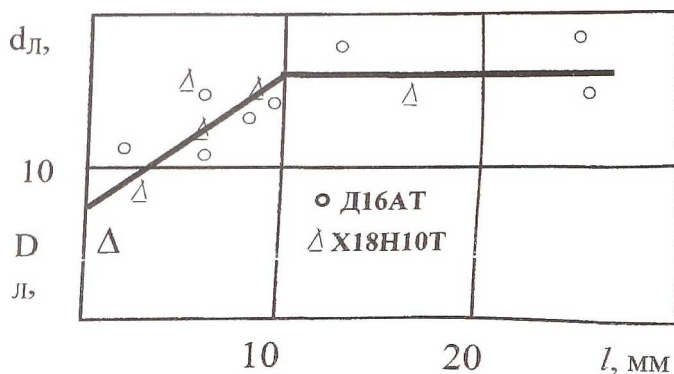


Рис. 3 Зависимость диаметра лунки от ее глубины.

плавления соответствующего материала фиксируется время нагрева τ_n , подтверждаемое также и визуальным контролем по появлению частичек расплавленного материала в струе. При дальнейшем воздействии струи термопара в точке А, расположенная в непосредственной близости от передней поверхности пластины, разрушается и работает термопара в точке В на задней поверхности пластины. В момент ее разрушения фиксируется время плавления отверстия τ_n . Для исследования динамики процесса выполнялись опыты с неполным проплавлением отверстия. В каждом опыте измерялся объем выплавляемого материала v (рис. 2) по объему слепка соответствующей лунки. Этот объем, приведенный к цилиндрической форме, определял в свою очередь, характерный размер отверстия d .

До некоторой толщины δ зависимости $d=f(\delta)$ или $d=f(\ell)$ близким к линейным, а при больших толщинах характерный размер отверстий практически не меняется (рис. 3). При чем область возрастающего диаметра лунки совпадает с координатами звукового участка струи, если, в качестве определяющей координаты принять расстояние до задней поверхности пластины. Это позволяет согласовывать результаты [2,5,6] для тонких пластин с эффектом влияния δ на размер лунки. В этом случае характерные размеры струи определяются соотношениями:

$$d_m = n_B^{0,6} d_{кр}, \quad (7)$$

$$S = \left[\frac{n_B}{1,2 + 0,3n_B} + 4,2\sqrt{n_B} - 0,4 \right] d_{кр}, \quad (8)$$

$$d_{зв} = 2,72\sqrt{n_B + (n_B - 1) / n} d_{кр}, \quad (9)$$

$$h_{зв} = (4,4n_B + 3)e^{0,11n} d_{кр}. \quad (10)$$

А характерные диаметры лунки:

- в диапазоне $h + \ell \leq s$

$$d_n = d_m \quad (11)$$

- в диапазоне $h_{зв} \geq h + \ell > s$

$$d_n = \left[\frac{(d_m h_{зв} - d_{зв} s)}{(h_{зв} - s)} \right] + \left[\frac{(d_{зв} - d_m)}{(h_{зв} - s)} \right] (h + \ell) \quad (12)$$

Последнее выражение удовлетворительно описывает экспериментальные данные для пластин разной толщины и выполненных из различных материалов (рис.4), а выражение (11) подтверждается экспериментально [2,5,6]. В области Причем $h + \ell > h_{зв}$

по крайней мере до величины $2h_{зв}$ диаметр лунки, как показали эксперименты, сохраняем постоянное значение: $d_{л} = d_{зч}$.

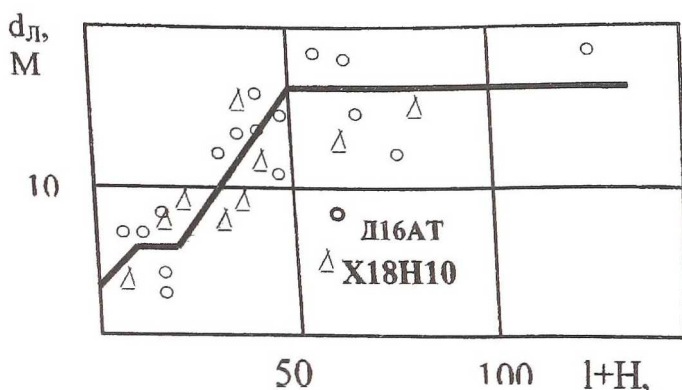


Рис. 4 Сопоставление размеров лунки и струи.

В свою очередь характерный диаметр лунки позволяет определить и другие ее размеры, входящие в (5,6), а следовательно получить уравнение выплавления отверстия в интегральной форме с учетом толщины преграды. Это позволяет еще на стадии проектирования генератора сверхзвуковых струй выделить область его параметров внутри которой решение соответствующей технологической задачи наиболее эффективно.

Список литературы

1. Первышин А.Н. Энергетика струйных технологий // Проблемы и перспективы развития двигателестроения в поволжском регионе.
2. Юдаев Б.Н., Михайлов Н.С., Савин В.К. Теплообмен при взаимодействии струей с преградами. - М.: Машиностроение, 1977. - 238с.
3. Панкратов Б.М., Полежаев Ю.В., Рудько А.К. Взаимодействие материалов с газовыми потоками. -М.: Машиностроение, 1976. -224с.
4. Первышин А.Н., Осипов А.И. Энергетика сверхзвуковой струи продуктов сгорания.// Процессы горения и охрана окружающей среды./ РАТИ. -Рыбинск, 1192. 47-53с.
5. Ацупов А.В. Исследование параметров нерасчетной сверхзвуковой струи газа //Журнал технической физики, 1974. Т.44. 372-379с.
6. Первышин А.М., Осипов А.И. Методика расчета температурных полей сверхзвуковых струй продуктов сгорания //Высокотемпературные газовые потоки, их получение и диагностика /ХАИ, Харьков 1987. -Вып.4. -34-36с.