

РАСЧЕТ СОПЛА ЛАВАЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

М.В. Радченко, Д.А. Нагорный

В последнее время в большинстве материалоемких отраслей промышленности большое внимание уделяется увеличению срока службы и восстановлению рабочих поверхностей различных деталей и механизмов. В ряде случаев для увеличения ресурса деталей целесообразным является применение различных способов нанесения защитных и упрочняющих покрытий на их рабочие поверхности. При этом удается достигнуть значительной экономии дорогостоящих материалов, поскольку деталь выполняется из дешёвых материалов, а все необходимые рабочие свойства обеспечивает защитное покрытие, нанесенное тонким слоем на рабочую поверхность детали.

Установлено, что качество наносимых покрытий и прочность сцепления покрытий с основой напрямую зависит от выбранного способа его нанесения. При этом наибольшей прочностью сцепления и отсутствием пористости обладают покрытия, нанесенные на поверхность путем наплавки, поскольку в процессе наплавки металл основы и покрытие, формируя общую металлическую ванну в тонком промежуточном слое и частично перемешиваясь, образуют монолитное соединение с металлической связью. Также известно, что чем выше плотность тепловой мощности источника в пятне нагрева, тем более высокого качества формируется покрытие. Это обусловлено тем, что участки зоны термического влияния (ЗТВ) более сконцентрированы, что сводит к минимуму образования различных дефектов (пор, трещин, отслоений, напряжений и др.), а также уменьшает тепловые потери на нагрев участков, не требующих нанесения покрытий.

На практике чаще всего к высококонцентрированным источникам нагрева, позволяющим реализовать качественное нанесение покрытий, относят лазерные лучи, электронно-лучевые пучки в вакууме и плазменные струи с ламинарными потоками. Защитные покрытия, нанесенные при помощи таких источников нагрева, характеризуются наиболее высокими качественными показателями (высокая однородность покрытия, отсутствие дефектов и др.). При этом к недостаткам способов нанесения покрытий с использованием данных источников нагрева относятся доро-

говизна и относительная сложность оборудования. Поэтому для условий производства, важной инженерной задачей является разработка относительно недорогой, компактной аппаратуры с мощным источником нагрева, что является достаточно сложной технической задачей.

Одним из путей решения данной задачи является повышение концентрации тепловой мощности газокислородного пламени. Этого можно достичь модернизацией дозвуковой газопламенной аппаратуры посредством использования сверхзвуковых сопел (сопел Лаваля). Сверхзвуковые сопла позволяют формировать сжатый газовый поток с высокой скоростью истечения продуктов сгорания, что способствует увеличению концентрации энергии данного источника нагрева, вводимой в нагреваемую поверхность и сокращению размеров ЗТВ. Образующий при этом процесс наплавки сочетает в себе простоту оборудования и реализации самого процесса, свойственную способам газопламенного нанесения покрытий, а также высококонцентрированный ввод энергии, близкий к таким высокоэнергетическим процессам нанесения покрытий, как газоплазменная наплавка и др.

Важным этапом при разработке сверхзвукового газопламенного оборудования является расчет конфигурации сверхзвукового сопла. Особенностью расчетов сопла для каждого конкретного случая практического применения является выбор исходных технических данных. В то же самое время, именно это сочетание известного пути решения и оригинальных исходных данных подчинено конечной практической цели. В данном случае это формирование высокотемпературного газопламенного потока для реализации процесса наплавки промышленно выпускаемых порошковых металлических сплавов, фракцией 40-100 мкм.

Исходными параметрами при расчете сечения для образования сверхзвукового истечения газов являются: требуемая скорость истечения газов на срезе сопла и установленный расход газов. Как известно, скорость истечения газов на срезе сверхзвукового сопла, определяется числом Маха "М". М – безразмерная величина, значение которой показывает, во сколько раз скорость истечения

РАСЧЕТ СОПЛА ЛАВАЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРОШКОВОЙ НАПЛАВКИ

газов, формируемая сверхзвуковым соплом, превышает скорость звука [1].

Для формирования сверхзвуковой газовой струи скорость истечения газов на срезе сопла (определяемая числом Маха – M) должна превосходить скорость звукового барьера (при $V_{\text{зв.барьера}} \approx 331$ м/с, $M \approx 1$) в известное число раз. Расход газов определяется исходя из возможностей газоподводящей аппаратуры.

Сверхзвуковое сопло Лавалья [1], предназначенное для получения высокоскоростного потока состоит из трех участков (рисунок 1):

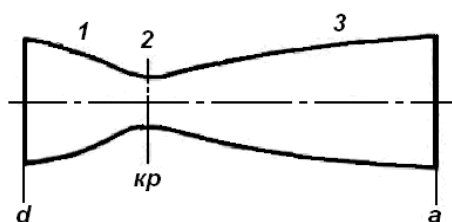


Рисунок 1. Сверхзвуковое сопло Лавалья

1- участок сужения, где поток газов имеет дозвуковую скорость;

2- критическое сечение, где скорость газового потока равна скорости звука;

3- участок расширения, где скорость потока превосходит скорость звука.

При расчете сопла, исходя из литературных данных [1], необходимо учитывать следующие условия:

- для получения на срезе сверхзвукового сопла определенного значения числа M необходимо соответствующим образом подобрать площадь сечения и, кроме того, надо иметь достаточный запас давления в камере перед соплом. Другими словами, для достижения требуемого числа M на срезе сопла давление в камере должно в известное число раз превосходить давление окружающей среды;

- давление на срезе данного сверхзвукового сопла не связано с давлением атмосферы, а зависит только от давления в камере перед критическим участком и формы сопла.

Таким образом, для формирования сверхзвукового потока требуемой величины нужно выбрать необходимое значение величины M , а также, исходя из возможностей газоподводящей аппаратуры, определить допустимый расход газов, при котором возможно обеспечить необходимый запас давления в камере перед соплом.

Зависимость скорости газового потока на срезе сопла от площади поперечного сечения

выражается уравнением неразрывности (1):

$$\rho w F = \rho_{кр} w_{кр} F_{кр} \quad (1)$$

Согласно справочным данным [1], данная зависимость для воздуха и других газов и определяется по графику (рисунок 2), согласно формуле (2):

$$\frac{F}{F_{кр}} = \frac{(1 + 0,2 M^2)^3}{1,73 M} \quad (2)$$

где $M \approx W / A$, (W -скорость на срезе сопла, A -критическая скорость (скорость звука)); $M_{\text{кр}} \approx 1$.

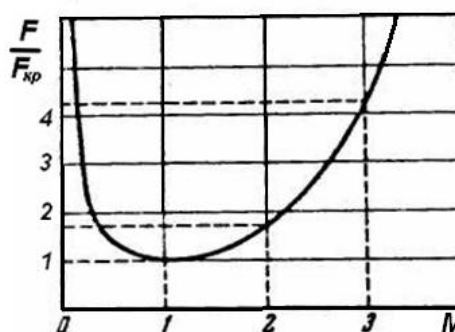


Рисунок 2. Зависимость удельной скорости газового потока от удельного сечения сопла

Необходимо учесть, что увеличение скорости газа с помощью сопла Лавалья пропорционально уменьшению плотности газового потока на выходе из сопла. Следовательно, для создания стабильной сверхзвуковой газовой струи не следует принимать слишком высоких значений числа Маха. Таким образом, требуемое сечение сверхзвукового сопла должно поддерживать стабильное горение высокоскоростного газового потока без резких скачков уплотнения и обрывов пламени.

Исходя из вышеизложенного, значение искомого числа M будем определять в диапазоне $M=3...4$. Тогда по формуле (2) с учетом выбранного диапазона числа M определим диапазон значений отношений площадей $F_{\alpha} / F_{кр}$, где F_{α} - сечение на выходе из участка расширения, $F_{кр}$ - критическое сечение.

Согласно формуле (2), при $M = 3$ отношение площадей $F_{\alpha} / F_{кр} \approx 4,2$, тогда как при $M = 4$ отношение площадей сечений $F_{\alpha} / F_{кр} \approx 10,7$.

Таким образом, зная площадь критического сечения сопла и учитывая конструк-

тивные особенности изготовления, требуется определить наиболее подходящее отношение площадей в диапазоне отношений 4,2...10,7.

Рассчитаем максимально-допустимую площадь критического сечения сопла в зависимости от расхода газов (пропускной способности). Для расчета воспользуемся формулой неразрывности (1). Согласно данной формуле, массовый расход газов G ($кг/сек$) определяется следующим выражением:

$$G_m = p_{kp} w_{kp} F_{kp}, \quad (3)$$

где p_{kp} - плотность газа в критическом сечении сопла;

w_{kp} - скорость в критическом сопле (равна скорости звука);

F_{kp} - площадь критического сечения сопла.

Исходя из формулы (3), площадь критического сечения сопла F_{kp} можно определить с помощью следующего выражения:

$$F_{kp} = \frac{G_m}{p_{kp} w_{kp}}. \quad (4)$$

Таким образом, для определения площади критического сечения сопла поэтапно определим числовые значения расхода газов (G) и плотности газов в критическом сечении (p_{kp}).

На первом этапе необходимо определить расход газов G_m . При этом в качестве горючего газа применительно к данным расчетам принимаем пропан, поскольку пропан является более доступным, удобным и безопасным в эксплуатации газом, в сравнении с ацетиленом. Среднее газопотребление мобильной газопламенной аппаратуры для газопламенного нанесения покрытий, типа УПН, Термика, ГН-5 и др. составляет: по кислороду $G = 4-5 \text{ м}^3/ч$; по горючему газу (при использовании пропана) $G = 1-1,5 \text{ м}^3/ч$. Ориентируясь на данное газопотребление, установим максимальный расход газов для проектируемого профиля сопла: $G_{O_2} = 5 \text{ м}^3/ч$; $G_{C_3H_8} = 1,2 \text{ м}^3/ч$ (по аналогии со средним газопотреблением наплавочной горелки ГН-5). Тогда массовый расход каждого из газов горючей смеси составит:

$$G_m = G \cdot \rho, \quad (5)$$

где G - объемный расход газа, $\text{м}^3/сек$;

ρ - плотность газа, $кг/м^3$.

Согласно табличным данным плотность кислорода составляет $\rho_{O_2} = 1,33 \text{ кг/м}^3$; плотность пропана составляет $\rho_{C_3H_8} = 1,88 \text{ кг/м}^3$.

При этом массовый расход кислорода составит:

$$G_{m_{O_2}} = G_{O_2} \cdot \rho_{O_2} = 1,847 \cdot 10^{-3} \text{ кг/сек},$$

а массовый расход пропана составит:

$$G_{m_{C_3H_8}} = G_{C_3H_8} \cdot \rho_{C_3H_8} = 0,63 \cdot 10^{-3} \text{ кг/сек}.$$

Тогда суммарный массовый расход газов, составляющих горючую смесь, проходящий через критическое сечение:

$$\sum G_m = G_{m_{O_2}} + G_{m_{C_3H_8}} = 2,477 \cdot 10^{-3}$$

$кг/сек$.

На втором этапе определим плотность газовой смеси, проходящей через критическое сечение p_{kp} . Газовая смесь, требуемая для формирования нейтрального и науглероживающего пламени, необходимого для реализации процесса наплавки, состоит из кислорода и пропана в отношении порядка 3,5:1, поэтому средняя плотность газовой смеси будет определяться следующим выражением:

$$\rho_{cp} = \frac{(3,5 \cdot \rho_{O_2} + 1 \cdot \rho_{C_3H_8})}{3,5 + 1}, \quad (6)$$

где ρ_{O_2} - плотность кислорода,

$\rho_{C_3H_8}$ - плотность пропана.

Таким образом, средняя плотность газовой смеси при атмосферном давлении составит: $\rho_{cp} = 1,455 \text{ кг/м}^3$.

Поскольку для формирования высокоскоростного газового потока на срезе сопла в камере смешения газов перед критическим участком сопла необходимо сформировать запас давления, в известное число раз превосходящий давление окружающей среды, принимаем величину давления в докритическом участке сопла равной $P_{докрит.} = 4 \text{ атм}$.

Тогда плотность газовой смеси в критическом сечении сопла p_{kp} определится следующим выражением:

РАСЧЕТ СОПЛА ЛАВАЛЯ ПРИ РАЗРАБОТКЕ АППАРАТУРЫ ДЛЯ СВЕРХЗВУКОВОЙ ГАЗОПОРШКОВОЙ НАПЛАВКИ

$$p_{кр} = P_{докрит.} \cdot p_{ср} = 5,82 \text{ кгс/м}^2. \quad (7)$$

Следует также отметить, что в данных расчетах не принимается во внимание тепловое расширение газовой смеси в процессе её неполного сгорания в камере смешения перед критическим участком сопла. Это при практической реализации процесса наплавки позволит формировать необходимый высокоскоростной газовый поток при меньшем расходе газов, составляющих горючую смесь. Данный факт позволит снизить расход газов в процессе наплавки при использовании для формирования рабочего пламени сверхзвукового сопла, что является выгодным экономическим решением.

Таким образом, на основании полученных данных (значений G_m и $p_{кр}$) и учитывая, что скорость звука в воздухе $W_{кр} \approx 300 \text{ м/с}$, согласно формуле (4) определим критическую площадь сечения:

$$F_{кр} = \frac{G_m}{p_{кр} W_{кр}} \approx 1,42 \text{ мм}^2.$$

Зная критическую площадь, определим максимальный диаметр критического сечения для заданного расхода газов:

$$F_{кр} = \pi \cdot r^2, \text{ откуда } r = \sqrt{\frac{F_{кр}}{\pi}},$$

$$r_{кр} = \sqrt{\frac{F_{кр}}{\pi}} = 0,673 \text{ мм, откуда}$$

$$d_{кр} = r_{кр} \cdot 2 = 1,34 \text{ мм.}$$

Учитывая конструктивные особенности изготовления и оптимальные режимы работы газоподающей аппаратуры, принимаем диаметр критического сечения $d_{кр} = 1,2 \text{ мм}$. Тогда значение площади критического сечения (при $d_{кр} = 1,2 \text{ мм}$) составит:

$$F_{кр} = \pi \cdot r^2 = 1,1304 \text{ мм}^2.$$

Определим значение диаметра на выходе из участка расширения D_α :

$$\frac{F}{F_{кр}} = \frac{\pi \cdot r^2}{\pi \cdot R^2} = \left(\frac{D}{d_{кр}} \right)^2,$$

$$\text{отсюда } D = d_{кр} \cdot \sqrt{\frac{F}{F_{кр}}}$$

Поскольку при $M=4$ отношение $F/F_{кр} \approx 10,7$, тогда $D = 1,2 \cdot \sqrt{10,7} \approx 3,96 \text{ мм}$.

Принимая диаметр сечения на выходе

из участка расширения (F_α) $D_\alpha = 4 \text{ мм}$, значение площади сечения F_α :

$$F_\alpha = \pi \cdot r^2 = 3,14 \cdot 2^2 = 12,56 \text{ мм}^2.$$

Тогда отношение площадей докритического и критического сечений составит: $F_\alpha / F_{кр} \approx 11,1$.

Значение отношений данных площадей немногим выше заданного ранее диапазона 4,2...10,7. Число Маха при данном отношении $F_\alpha / F_{кр}$ составляет $M \approx 4,04$, что незначительно выше принятого диапазона $M=3...4$. Поэтому, исходя из конструктивных соображений, значение диаметра критического сечения принимаем равным $d_{кр} = 1,2 \text{ мм}$, а значение диаметра сечения на выходе из участка расширения (α , см. рисунок 1) принимаем $d_\alpha = 4 \text{ мм}$.

Таким образом, в результате проведенного анализа и расчетов сопла Лавалья получены базовые данные для определения геометрических параметров сверхзвукового сопла, как основного узла, обеспечивающего повышение температуры пропано-кислородного пламени и повышение концентрации в пятне нагрева в процессе сверхзвуковой газопоршковой наплавки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика: [В 2 ч.] - 5-е изд. перераб. и доп. - М: Наука, 1991. - 824 с.
2. Большая Советская Энциклопедия: в 30 т./ гл. ред. А.М.Прохоров.- Изд. 3-е.- М.: Советская Энциклопедия, 1976. Т.24: События-Струна. 1976. - С. 185-186.
3. Дейч М.Е. Техническая газодинамика.- Изд. 3-е перераб. - М: Энергия, 1974. - 592 с.
4. Баев В.К., Головичев В.И., Третьяков П.К. и др. Горение в сверхзвуковом потоке - Новосибирск: Наука, 1984. - 291 с.