

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ ПЛАЗМЕННОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ

В.Е. МЕССЕРЛЕ, Г.Т. МУРЗАКУЛОВ, В.С. ПЕРЕГУДОВ, А.Л. СОРОКИН

Институт теплофизики СО РАН, Новосибирск

Рассмотрена конвективная составляющая теплообмена в широко применяющейся технологии плазменной резки листовых металлических материалов. На основе анализа теплопередачи через пленку стекающего расплава выделен безразмерный комплекс, определяющий интенсивность переноса тепла. Показано, что литературные данные по режимным параметрам обобщаются предложенной зависимостью.

Плазменная резка листовых металлических материалов является одной из основных технологий в ряде отраслей машиностроения (судостроение, химическое машиностроение и т. д.). Сравнение газопламенного, лазерного и плазменного способов резки основных конструкционных материалов (углеродистые и нержавеющие стали, алюминиевые сплавы, титан), проведенное в [1], показало, что в диапазоне толщин 10 – 100 мм последний является наиболее эффективным. Типовые режимы плазменной резки основных конструкционных материалов с применением стандартного, серийно выпускаемого оборудования отработаны и приводятся в литературе для технологов [2 – 4]. Однако при определении режимных параметров для нового материала и/или технологического оборудования необходимо значительное количество технологических экспериментов. Такое положение обусловлено отсутствием достаточно точных методик теплового расчета процесса плазменной резки.

Для проведения оценочных расчетов в простейшем случае применяют уравнение баланса тепла [2]:

$$\eta P = \rho bHw(L_m + c(T_m - T_0)).$$

Здесь P — полная мощность, H — толщина материала, b — ширина реза, η — безразмерный коэффициент, w — скорость резания, ρ , c , T_m , L_m — плотность, теплоемкость, температура и удельная теплота плавления материала соответственно. Наиболее труднооцениваемой величиной здесь является коэффициент η , определяющий часть полной мощности P , расходуемой на плавление материала.

Неполнота приводимых в литературе данных и многопараметричность процесса затрудняют применение теории подобия для построения критерияльных соотношений. Для учета многопараметричности процесса в [5] применялся метод математического планирования экспериментов. Однако возможности использования полученных результатов ограничены, поскольку этот метод, определяя количественные связи параметров, не опирается на физиче-

скую модель процесса. В данной работе предлагается модель, позволяющая построить критериальную зависимость для конвективной составляющей теплообмена.

При плазменной резке (как правило, короткой дугой прямой полярности, стабилизированной потоком газа) тепловой поток к поверхности реза складывается из анодного тепловыделения и конвективного потока от струи плазмы. Вводя коэффициент теплопередачи α , уравнение баланса энергии можно записать в следующем виде:

$$\rho w H_m = \alpha (T_g - T_m) + \frac{IU_a}{bH},$$

где IU_a — анодное тепловыделение, H_m — энтальпия плавления материала. Значения коэффициента α , вычисленные по данным [2] для резки нержавеющей стали в азоте и алюминия в аргон-водородной смеси, представлены на рис. 1. При обработке литературных данных энтальпия плавления материалов вычислялась по данным [6]. Температура газа определялась по среднemasсовой энтальпии плазменной струи, тепловая мощность которой рассчитывалась по полной электрической мощности за вычетом катодного и анодного тепловыделения. Энтальпия аргон-водородной смеси вычислялась по данным [7], катодное и анодное тепловыделение — по данным [8]. Одинаковый характер изменения коэффициента теплообмена в диапазоне толщин 10 — 100 мм показывает, что при выборе соответствующих масштабов можно получить обобщенную зависимость.

Скорость движения фронта плавления определяется тепловым потоком через пленку стекающего расплава. С увеличением толщины пленки увеличивается температура ее поверхности, которая не может превышать температуры кипения материала, при которой тепловой поток к поверхности пленки резко снижается вследствие оттока паров. Поэтому плотность теплового потока в значительной мере определяется температурой поверхности пленки. Для получения оценки температуры поверхности рассмотрим фронт плавления как вертикальную плоскость, движущуюся в горизонтальном направлении с постоянной скоростью. Предполагая, что определяющим фактором является газодинамическое действие потока плазмы, используем линейную аппроксимацию профиля скорости в пленке

$$u(x, y) = \frac{\tau_s}{\nu} y.$$

Здесь ось x системы координат направлена вертикально вниз, а ось y — горизонтально против движения фронта. Считая, что τ_s не зависит от x , из уравнения неразрывности

неразрывности

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

получим

$$\int_0^{h(x)} u(y) dy = \frac{\tau_s}{2\nu} h(x)^2 = w_w x,$$

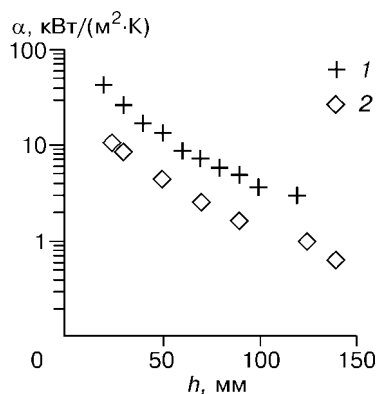


Рис. 1. Зависимость коэффициента теплообмена от толщины разрезаемого материала.

1 — нержавеющая сталь, азот; 2 — алюминий, аргон-водородная смесь.

где w_w — скорость движения фронта плавления. Для толщины стекающей пленки получим $h(x) = ((2w_w vx)/\tau_s)^{1/2}$. Предполагая также линейность профиля температуры, вычислим плотность теплового потока

$$q = \rho w_w (c(T_m - T_0) + L_m) = \lambda \frac{T(x, h) - T_m}{h(x)},$$

откуда

$$T(x, h) = T_m + (T_m - T_0) \left(1 + \frac{L}{c(T_m - T_0)} \right) \frac{w_w h(x)}{a}.$$

Считая коэффициент теплоотдачи постоянным на поверхности пленки и интегрируя локальную плотность теплового потока $q = \alpha(T_g - T(x, h))$, для средней плотности теплового потока к поверхности получим следующую оценку:

$$\frac{1}{H} \int_0^H q dx = \bar{q} = \alpha \left((T_g - T_m) - \frac{2}{3} \sqrt{\frac{v}{a}} (T_m - T_0) \left(1 + \frac{L}{c(T_m - T_0)} \right) \sqrt{\frac{2w_w^2}{\tau_s}} \sqrt{\frac{w_w H}{a}} \right).$$

Прямое применение этой формулы затруднено, так как необходима информация о теплофизических свойствах расплава и динамическом воздействии потока на пленку. Однако предполагая, что $\tau_s \propto G_g^2$ (G_g — расход газа), из этой зависимости можно выделить размерный комплекс режимных параметров $w_w^{3/2} H^{1/2} G_g^{-1}$. Введем $G_m = \rho w_w S_0$ — поток материала через единичную поверхность $S_0 = 1 \text{ м}^2$ и критерий Пекле $Pe = (w_w H)/a$. Тогда выделенный выше комплекс можно привести к безразмерной форме $\chi = (G_m / G_g) Pe^{1/2}$. Критерий Нуссельта определим как $Nu = (\alpha D_c) / \lambda_{gm}$, где D_c — диаметр сопла, λ_{gm} — теплопроводность газа при температуре плавления материала. Приведенные к безразмерной форме данные представлены на рис. 2. Как видно, при таком представлении данные удовлетворительно обобщаются линейной зависимостью $Nu = 0,78\chi$.

Таким образом, предложенная модель процесса плазменной резки позволяет выделить определяющий коэффициент конвективной теплопередачи комплекс, зависящий от режимных параметров и теплофизических свойств газа и металла. На основе анализа рекомендованных в литературе [2] типовых режимов плазменной резки показано, что соответствующий критерий Нуссельта является линейной функцией указанного комплекса.

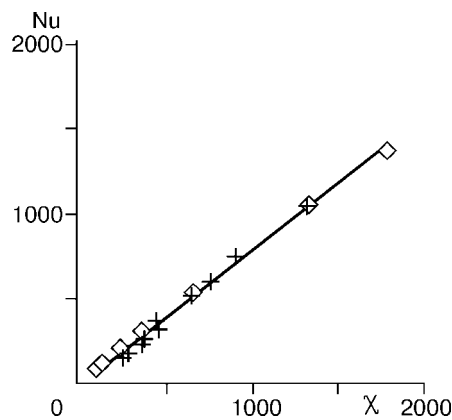


Рис. 2. Обобщение данных по конвективному теплообмену.

Обозначения см. к рис. 1; линия — аппроксимация $Nu = 0,78\chi$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваленко В.С., Романенко В.В., Олещук Л.М. Малоотходные процессы резки лучом лазера. — Киев: Техника, 1987. — 112 с.
2. Васильев К.В. Плазменно-дуговая резка. — М.: Машиностроение, 1974. — 111 с.
3. Соколов И.И. Газовая сварка и резка металлов. — М.: Высшая школа, 1978. — 319 с.
4. Быховский Д.Г. Плазменная резка. — Л.: Машиностроение, 1972. — 168 с.
5. Достовалов В.А. Экспериментальное исследование газодинамического воздействия на короткую электрическую дугу: Дис. ... канд. техн. наук. Владивосток, ДВПИ, 1982.
6. Зиновьев В.Е. Теплофизические свойства металлов при высоких температурах. — М.: Металлургия, 1989. — 384 с.
7. Рыбаков В.В., Бургасов М.П. Термодинамический расчет высокотемпературного газа. — М.: Машиностроение, 1968. — 126с.
8. Основы расчета плазмотронов линейной схемы. Оперативно-информационный материал. / Под ред. М.Ф. Жукова. — Новосибирск: Изд. Ин-та теплофизики АН СССР, 1979.

Статья поступила в редакцию 15 апреля 1999 г.