

УДК 536.24:621.791.55

Лебедев Б. В., Байковский Д.В.  
ОНМА

## УТОЧНЕНИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ЗНАЧЕНИЯ НЕОБХОДИМОЙ ТЕПЛОВОЙ МОЩНОСТИ ЭКЗОТЕРМИЧЕСКОГО СТЕРЖНЯ ПРИ НАПЛАВКЕ

Важнейшим параметром, определяющим качество сварочных операций (к которым относится и наплавка) является достижение температуры плавления основного металла.

Для осуществления процесса сварки или наплавки необходимо подвести к зоне наплавки определенное количество энергии, достаточное для нагрева и, возможно, частичного расплавления основного материала и для компенсации тепловых потерь.

В случае электрической наплавки необходимая мощность обеспечивается источником питания, который в принципе может обеспечить любую необходимую мощность.

В случае же использования экзотермических средств, их мощность должна быть определена заранее как можно точнее, так как от значения мощности будет зависеть состав экзотермического стержня его габариты и цена. Нагрев основного металла в этом случае осуществляется только теплопередачей со стороны присадочного металла, поступающего в рабочую зону (зону сварки или наплавки) в жидком состоянии.

На первом этапе теоретических исследований тепловую мощность рассчитывали, используя классические представления, изложенные в работе «Теория теплопроводности» [1] т. е. рассматривая процесс нагрева поверхности детали некоторым сосредоточенным источником тепла, с учетом КПД процесса теплообмена, который, в свою очередь определяется коэффициентами теплового влияния [2]:

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda \cdot C \cdot \rho} \frac{Kz}{K \cdot c^{2,5}} \quad (1)$$

Здесь:  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности;

$C$  – теплоемкость материала;

$\rho$  – плотность материала.

Тогда КПД:

$$\eta = \frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_T + \varepsilon_M} \quad (2)$$

Уже на этапе предварительных расчетов выяснилось, что термитные стержни системы Fe - сталь, имеющие обычную длину 150 - 200 мм, при наиболее распространенных скоростях горения 5 - 8 мм/с не могут обеспечить разогрев свариваемого металла до необходимой температуры за время своего горения, в результате чего сварка невозможна. То есть, не применимы для производства сварки или наплавки, дальнейшие экспериментальные исследования проводились только с использованием составов выделяющих медные сплавы.

Однако, экспериментальные исследования по производству наплавки тонких слоев присадочного металла на массивные стальные детали (валы) показали, что рассчитанная мощность недостаточна, для получения качественной наплавки.

Цель дальнейших исследований – состояла в определении причины расхождений теоретической и экспериментальной потребной тепловой мощности.

Основными задачами исследования являются:

1. Определение количественной погрешности теоретической формулы.
2. Определение причины погрешности.
3. Корректировка формулы и получение хорошей сходимости теоретических и экспериментальных исследований.

В общем случае определение мощности теплового источника при проведении сварочной (наплавочной) операции, сводится к определению потребителей тепла и той тепловой мощности, которую они способны поглотить.

Как уже отмечалось - для производства качественной сварочной операции необходимо разогреть поверхность свариваемой или наплавляемой детали до температуры плавления. При этом надо учитывать теплообмен между деталью и окружающей средой.

В общем случае теплоотдача окружающей среде осуществляется одновременно тремя способами: теплопередача внутри тела, конвективная теплоотдача от тела непосредственно в окружающую среду и лучистая теплоотдача. При различных условиях теплообмена влияние каждой из этих составляющих весьма различно.

Таким образом:

$$Q_{св} = Q_k + Q_m + Q_l \quad (3)$$

Здесь:

$Q_{св}$  – тепловая мощность источника тепла;

$Q_k$  - конвективная теплоотдача;

$Q_m$  - тепловой поток, отводимый теплопроводностью внутри тела;

$Q_l$  - теплоотдача излучением.

Однако тепловой поток внутри тела будет иметь место только на первом, нестационарном этапе теплового взаимодействия, пока идет нагрев пластины, при достижении теплового равновесия тепловой поток, отводимый теплопроводностью, иссякает, и, если речь идет об установившемся режиме, со стабильной зоной теплового насыщения, практически равен 0.

Таким образом, приведенное выше выражение упрощается:

$$Q_{св} = Q_k + Q_l \quad (4)$$

Теплоотдачу от поверхности равномерно нагретого тела можно выразить как:

$$Q = \int_F \alpha \cdot \Delta t dF, \quad (5)$$

здесь:  $F$  – полная площадь теплоотдачи со стороны тела;

$\Delta t$  – разность температур в каждой точке на поверхности пластины и окружающей среды;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи;

Если допустить, что пластина нагрета равномерно, т. е.

$$\Delta t = const = t_{нов} - t_{ср.},$$

то конвективная теплоотдача может быть выражена уравнением:

$$Q = F_{пл} \cdot \alpha \cdot (t_{нов} - t_{ср}), \quad (6)$$

здесь:  $F_{пл}$  – полная площадь теплоотдачи пластины;

$t_{нов}$  – температура на поверхности пластины;

$t_{ср}$  – температура окружающей среды;

$\alpha$  - коэффициент теплоотдачи, который можно выразить как:

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda_e}{l} \quad (7)$$

Здесь:  $\lambda_e$  - теплопроводность воздуха;

$l$  – характерный размер –  $l = \sqrt{F_{пл}}$

$Nu$  – критерий теплового подобия Нуссельта - безразмерный комплекс, наиболее полно описывающий условия теплопередачи от нагретого тела окружающей среде, являющийся в свою очередь производным от критериев Гразгофа и Прандтля.

$$Nu = 0.51 \cdot \sqrt[4]{Gr \cdot Pr} = 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (t_{nl} - t_{cp})}{a \cdot \nu}} \quad (8)$$

$\nu$  – кинематический коэффициент вязкости окружающей среды [м<sup>2</sup>/с]

$a$  – коэффициент температуропроводности окружающей среды [м<sup>2</sup>/с]

$g$  – ускорение свободного падения [м/с<sup>2</sup>];

$\beta$  – коэффициент объемного расширения [1/К].

Коэффициент теплоотдачи тогда:

$$\alpha = 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot l^3 \cdot \beta \cdot (t_{nl} - t_{cp})}{a \cdot \nu}} \cdot \frac{\lambda_{\text{с}}}{l} = 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot \lambda_{\text{с}}^4 \cdot (t_{nl} - t_{cp})}{a \cdot \nu \cdot l}} \quad (9)$$

Это выражение удовлетворительно описывает только теплоотдачу с равномерно нагретой поверхности.

Однако, температура изменяется, уменьшаясь от источника.

Тогда избыточную температуру поверхности в какой-либо точке на расстоянии  $x$  от источника тепла можно выразить:

$$\Theta = \Theta_0 \cdot \frac{ch[m \cdot (l - x)]}{ch(m \cdot l)} \quad (10)$$

где:  $\Theta_0 = t_{\text{ист}} - t_{cp}$  – избыточная температура в точке контакта источника теплоты с поверхностью пластины (для данных условий температура в точке контакта приравнивается к температуре плавления материала пластины);

$$m = \sqrt{\frac{\alpha \cdot u}{\lambda \cdot f}}$$

здесь:  $u = 2 \cdot (\delta \square + h)$

$f = \delta \square \cdot h$

Единица измерения  $m$  — [1/м].

Количество теплоты, которое отдает пластина окружающей среде:

$$Q = \sqrt{\lambda \cdot f \cdot \alpha \cdot u} \cdot \Theta_0 \cdot th(m \cdot l) \quad (11)$$

### Теплоотдача излучением.

Выражение, описывающее теплоотдачу предложено С. Н. Шориным

$$q_R = \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 + \tau_0} \quad (12)$$

здесь  $\sigma_0$  – постоянная ( $C_0 = 5,6699 \cdot 10^{-8}$  Вт/(К<sup>4</sup> \* м<sup>2</sup>));  
 $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – степень черноты поверхностей теплообмена;  
 $T_1$  и  $T_2$  – абсолютные температуры поверхностей теплообмена;  
 $\tau_0$  – оптическая толщина слоя.

Таким образом можно получить общее выражение для расчета энергетической мощности точечного источника тепла используемого при наплавке:

$$Q_{\tau} = 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot \lambda_e^4 \cdot (t_{nl} - t_{cp})}{a \cdot v \cdot l}} \cdot E_p \cdot F_{nl} \cdot (t_{nos} - t_{cp}) + F_{nl} \cdot \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (13)$$

Было установлено, что это выражение не полностью учитывает количество тепла, необходимое для сварки, поскольку в нем отсутствует составляющая расплавления поверхностей свариваемых деталей для чего естественно необходимо затратить определенное количество тепла. Эта составляющая может быть оценена по выражению:

$$Q = \frac{D \cdot L \cdot h \cdot \rho}{\tau_{cs}} \cdot [(T_{плав} - T_{пл}) \cdot C + \Delta H] \quad (14)$$

где:  $D$  - диаметр термитного стержня,  
 $L$  - длина шва,  
 $h$  - глубина проплавления основного металла,  
 $\rho$  - плотность основного металла,  
 $\tau$  - время сварки,  
 $T_{пл}$  - температура плавления основного металла,  
 $C$  - теплоемкость основного металла,  
 $\Delta H$  - теплота плавления основного металла.

Что позволило получить формулу адекватно описывающую тепловую мощность источника.

Общая потребная мощность теплового источника с учетом тепловых потерь и расплавления кромок составит:

$$\begin{aligned}
 Q_{\tau} = & 0.51 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \cdot \beta \cdot \lambda_g^4 \cdot (t_{нл} - t_{сп})}{a \cdot \nu \cdot l}} \cdot E_p \cdot F_{нл} \cdot (t_{нов} - t_{сп}) + \\
 & + F_{нл} \cdot \frac{\sigma_0 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} + \\
 & + \frac{D \cdot L \cdot h \cdot \rho}{\tau_{са}} \cdot [(T_{плав} - T_{нл}) \cdot C + \Delta H]
 \end{aligned}
 \tag{15}$$

Рис. 1. иллюстрирует полученные результаты.

Как видно, особенно заметны расхождения с предыдущими расчетами в области наплавки тонких слоев, в том случае, когда поверхность теплоотдачи велика, а толщина наплавляемого металла, а, следовательно, его масса – относительно мала.

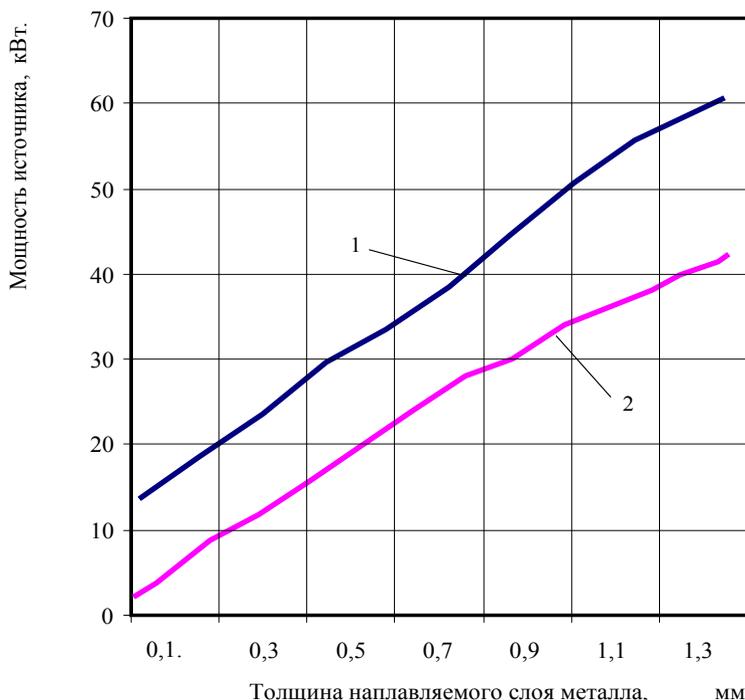


Рис. 1. Значения необходимой мощности теплового источника с учетом количества теплоты, затрачиваемой на расплавление металла при наплавке -1 и без учета -2

**Вывод:** скорректированная формула, дает возможность адекватно рассчитывать тепловую мощность экзотермического стержня при проведении операций сварки и наплавки.

#### *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Лыков А. В. Теория теплопроводности / А. В. Лыков - М.: Высшая школа, 1967. - 600 с.

2. Лебедев В. Г. Шлифование зубчатых колес абразивными, алмазными и эльборовыми кругами / В. Г. Лебедев– Киев: Техника, 1973. 48 с.

3. Лебедев Б. В. Определение энергетических характеристик технологических экзотермических смесей // Холодильна техніка і технологія. – Одеса: ОГАХ, 2008. - № 3. – С. 34 – 37.

4. Лебедев Б. В. Теоретическая модель процесса теплообмена сторающего экзотермического стержня и металлической пластины при резке под водой. // Проблемы техники. – Одесса: ОНМУ, 2008 № 3. – С. 22 – 31.

Лебедев Б. В. Применение энергонезависимых паяльно-сварочных средств при восстановлении деталей транспорта наплавкой. // Проблемы техники. – Одесса: ОНМУ 2012 Вып. 3. С. 60-67.