

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ СВАРИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ В КОМПАНИИ «СЦ МЕТАЛЛ МАРКЕТ», ИСТОРИЯ И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СВАРКИ ВЗРЫВОМ

На Российском рынке производством и поставками биметалла и биметаллических изделий, изготовленных методом сварки взрывом, ООО «СЦ Металл Маркет» занимается с 2008 года и занимает одно из лидирующих мест. Это преимущество по отношению к другим производителям обусловлено следующими факторами:

1. Наличием полигона в Московской области на базе ФГУП «НИИ «Геодезия» и квалифицированных кадров;
2. Возможностью круглогодичного проведения сварных работ (температура окружающей среды до минус 20°C);
3. Наличием технологического оборудования для проведения термообработки и механической правки биметаллических листов.

Явление сваривания металлов при взрывах было случайно обнаружено в экспериментах по пробиванию брони кумулятивными снарядами в 1944–1946 годах, которые проводились под руководством математика М.А.Лаврентьева. На *рис.1* изображен двухслойный образец, образовавшийся в результате одновременного обжатия двух плит из разных металлов. На нем видна основная особенность, характеризующая сварку, — волнообразование на поверхности контакта свариваемых металлов.

Затем в изучении сварки взрывом наступила длительная пауза. Систематические исследования начались в 1960-х годах главным образом в СССР и США. Первые математические результаты сварки взрывом принадлежат советским математикам А.А.Дерибасу и С.К.Годунову.

Простейшая схема

Сварку металлов взрывом можно производить по схеме, которая изображена на *рис. 2*. Свариваемые пластины устанавливаются в воздухе или в вакууме на некотором расстоянии друг от друга так, чтобы плоскости пластин составляли между собой угол α . Нижняя пластина прочно устанавливается на некоторой опоре, а на поверхности второй (иногда через какой-либо инертный подслои) размещается слой **ВВ**. Инициирование **ВВ** происходит у угла в точке **А** (см. *рис.2*). В результате взрыва метаемая пластина приобретает скорость порядка нескольких сот метров в секунду. В окрестности точки контакта при сварке взрывом, как и при схлопывании кумулятивных оболочек снарядов, развиваются столь высокие давления, что прочностные свойства металлов становятся несущественными, и в узкой зоне, примыкающей к поверхности контакта, можно пользоваться схемой несжимаемой жидкости. Явление волнообразования при сварке взрывом долгое время не находило теоретического объяснения.

Была, однако, экспериментально получена зависимость между длиной волны λ и параметрами соударения, которая в случае, когда метаемая пластина много тоньше неподвижной, имеет вид $\lambda = 26 \delta_1 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)$. В эту формулу, кроме толщины метаемой пластины δ_1 и угла соударения γ , не входят другие параметры соударяющихся металлов (в том числе и прочностные), что подтверждает гипотезу о гидродинамическом характере процесса волнообразования при сварке взрывом.

Соударение струи под малым углом. Математическая модель

Пусть две пластины толщиной δ_1 и δ_2 соответственно, которые мы будем считать плоскими струями невязкой сжимаемой жидкости, соударяются друг с другом. Дифференциальные уравнения гидродинамики мы запишем в акустическом приближении 1):

$$1) \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad 2) \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = 0, \quad v \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \\ \frac{\partial p}{\partial t} + \rho c^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0, \quad u \frac{\partial p}{\partial x} + \rho c^2 \left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) = 0,$$

где u и v — компоненты скорости, p — давление, ρ — плотность среды при $V = 0$, а c — скорость звука.

Мы будем предполагать, что $U < c$, ибо именно в этом случае происходит сварка взрывом, сопровождаемая волнообразованием. Нас интересует решение системы 1), стационарное в системе координат, связанной с точкой контакта. Поэтому мы положим u , v и p соответственно равными

$U + u(x + Ut, y), (x + Ut, y)$ и $p(x + Ut, y)$,
и тогда система уравнений 1) заменится следующей системой 2). Система 2) сводится к системе 3) в виде

$$3) \quad \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial(ky)} \left(\frac{v}{k} \right) = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial(ky)} - \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{v}{k} \right) = 0,$$

Отсюда следует, что функция $f = u - i \frac{v}{k}$ является аналитической функцией комплексного переменного $z = x + i k y$, а решение находится методами теории функций комплексного переменного.

Получается выражение для функции f :

$$f(z) = i U \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sqrt{\frac{2 \delta_1 \delta_2}{k \pi (\delta_1 + \delta_2)}} \frac{1}{\sqrt{-z}} = i \frac{U C}{\sqrt{-z}}.$$

В окрестности точки контакта находим $y = 2kC\sqrt{Ut} - x$ или, в системе координат, связанной с точкой контакта,

$$y = 2kC\sqrt{Ut} - x, \quad R = \frac{4}{\pi} \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}} \delta_1 \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)^3$$

Мы видим, что в окрестности точки контакта свободная поверхность представляет собой параболу. Для радиуса кривизны при $\delta_2 \rightarrow \infty$ мы получим формулу, сходную с экспериментальной формулой. Процесс сварки можно рассматривать как обратный к процессу образования трещин, и, как показали эксперименты, происходит выделение тепловой энергии в 3% от кинетической энергии при сварке, что равносильно ее затрате при образовании трещин.

В заключение следует отметить, что биметалл, изготовленный методом сварки взрывом, широко используется в производстве такими лидерами машиностроения, как ОАО «Уралхиммаш» с 1975 года, ОАО «Пензхиммаш», ОАО «Калужский турбинный завод», ОАО «Турбоатом», ОАО «Волгограднефтемаш», АО «АЭМ-технологии», ООО «Курганхиммаш», ЗАО НПО «НАТЭК-Нефтехиммаш», и др.. Этот метод также широко применяется для изготовления биметаллических заготовок трубных решеток за рубежом (см. «Промышленное применение сварки взрывом (обзор)», Бэнкер Дж., стр. 49–54, журнал «Автоматическая сварка», ноябрь 2009 г.).

С.Ю. АГАУРОВ,
к.ф.-м.н. И.Н. ЛАСКИН,
Ю.П. ЧЕРНОБАЙ