

МАТЕМАТИКА МЕТАЛЛОВ



Агауров Сергей Юрьевич,
генеральный директор
«Химмаш-Аппарат»



Ласкин Игорь Николаевич,
к.ф.-м.н.,
«Химмаш-Аппарат»



Чернобай Юрий Павлович,
«Химмаш-Аппарат»

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В ПРОИЗВОДСТВЕ БИМЕТАЛЛОВ, Т.Е. МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ ДВУХ МЕТАЛЛОВ, ПОЗВОЛЯЕТ ПОВЫСИТЬ НАДЕЖНОСТЬ И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ БОЛЬШОГО КЛАССА ДЕТАЛЕЙ И ОБОРУДОВАНИЯ, А ТАКЖЕ СНИЗИТЬ СЕБЕСТОИМОСТЬ ИЗДЕЛИЯ. ОСНОВНАЯ ЗАДАЧА ПРИ ИХ СОЗДАНИИ – ОБЕСПЕЧИТЬ ПРОЧНОЕ СОЕДИНЕНИЕ СЛОЕВ БЕЗ ИЗМЕНЕНИЯ ИХ ИСХОДНЫХ СВОЙСТВ. НАИБОЛЕЕ ПОЛНО ЭТА ЗАДАЧА РЕШАЕТСЯ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ МЕТОДА СВАРКИ ВЗРЫВОМ. ЧТО ПРЕДСТАВЛЯЕТ СОБОЙ МЕТОД СВАРИВАНИЯ МЕТАЛЛОВ ИМПУЛЬСНЫМ НАГРУЖЕНИЕМ, И ДЛЯ КАКИХ ОБЛАСТЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ ДАННЫЙ ОПЫТ ОСОБЕННО ИНТЕРЕСЕН?

TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION
TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION TRANSLATION

Ключевые слова: биметаллы, сварка взрывом, сваривание металлов импульсным нагружением, биметаллические заготовки.

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. Наличие полигона в Московской области на базе ФГУП «НИИ «Геодезия» и квалифицированных кадров;
2. Возможность круглогодичного проведения сварных работ (температура окружающей среды до 20 градусов ниже нуля по Цельсию);
3. Наличие технологического оборудования для проведения термообработки и механической правки биметаллических листов;
4. Наличие складской программы, позволяющей минимизировать сроки изготовления биметалла;
5. Высокий профессиональный уровень инженерного и производственного персонала, под руководством доктора технических наук Л.Б. Первухина, позволяет производить расчеты и сварные

работы самых сложных технических изделий (для атомной и судостроительной промышленности).

При производстве биметалла ООО «СЦ Металл Маркет» использует метод сварки взрывом, который позволяет получать биметаллические заготовки и изделия практически неограниченных размеров из разнообразных металлов и сплавов. Материалы – высоколегированные стали, титан и его сплавы, медь, латунь, бронза, алюминий и его сплавы, никель, никелевые и железоникелевые сплавы и т.п.

Явление сваривания металлов при взрывах было случайно обнаружено в экспериментах по пробиванию брони кумулятивными снарядами в 1944–46 гг., которые проводились под руководством

РИС. 1

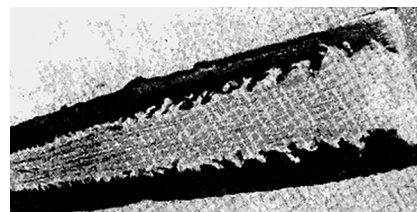
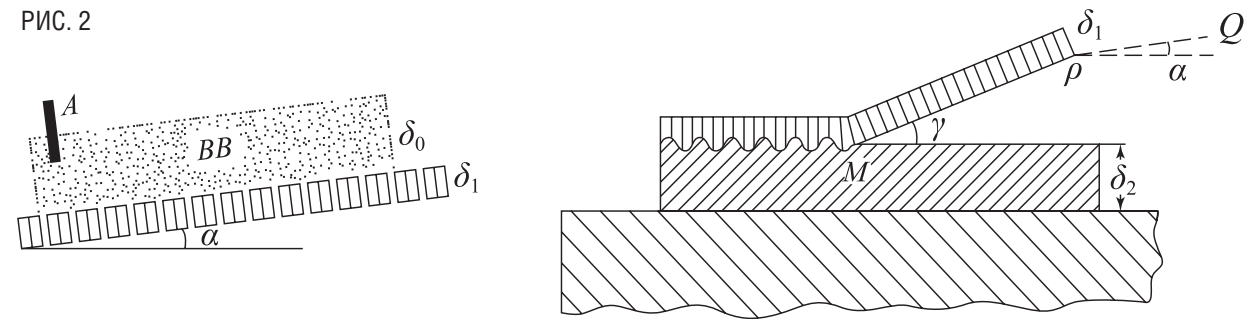


РИС. 2



математика М.А. Лаврентьева. На рис. 1 изображен полученный при этих экспериментах двухслойный образец, образовавшийся в результате одновременного обжатия двух кумулятивных конусов 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 60-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 подслоя) размещается слой ВВ. Иницирование ВВ происходит у угла в точке А на рис. 2. В результате взрыва метаемая пластина приобретает скорость порядка нескольких сот метров в секунду. Зная скорость V , можно найти угол соударения γ , который является важным параметром сварки. 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:

$$\lambda = 26 \delta_1 \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)^2.$$

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 так, как это показано на рис. 4. Здесь γ_1 и γ_2 – углы наклона пластин к оси x (так что угол соударения $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$), V_1 и V_2 – скорости пластин, направленные нормально к пластинам. Кроме того, если углы γ_1 и γ_2 малы, а ось

РИС. 3

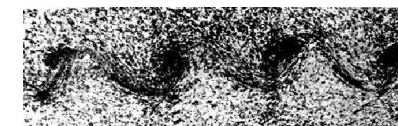
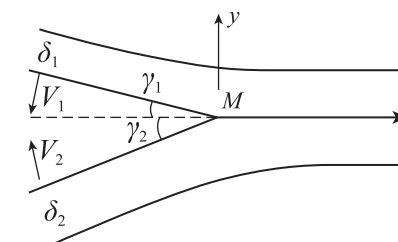


РИС. 4



x направлена вдоль поверхности контакта, то

$$\rho_1 \delta_1 |V_1| = \rho_2 \delta_2 |V_2|,$$

где ρ_1 и ρ_2 – плотности пластин. Дифференциальные уравнения гидродинамики мы запишем в акустическом приближении 1):

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad 1)$$

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

$$U \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad U \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} = 0, \quad 2)$$

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

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). Из первого уравнения видно, что величина

$$u + \frac{p}{\rho U}$$

является функцией только от y ; предполагая движение безвихревым, мы можем считать эту величину равной нулю во всей области течения:

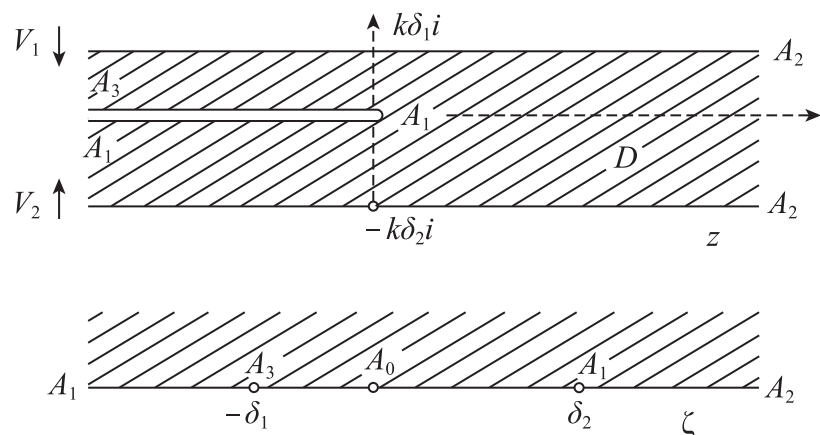
$$u = -\frac{p}{\rho U},$$

исключая еще из системы 2) давление p и вводя обозначение

$$\sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}}$$

(величина под корнем положительна, ибо мы считаем, что

РИС. 5



$U < c$), мы переписем эту систему в виде

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

Отсюда следует, что функция $f = u - i \frac{v}{k}$ является аналитической

функцией комплексного переменного $z = x + i k y$, а решение изящно находится методами теории функций комплексного переменного. Будем приближенно считать, что $\rho_1 = \rho_2 = \rho$, $c_1 = c_2 = c$ и пластины изображаются в плоскости (x, y) полосами $\{0 < y < \delta_1\}$ и $\{-\delta_2 < y < 0\}$.

Тогда функция f будет аналитической в полосе $\{-k \delta_2 < \text{Im } z < k \delta_1\}$ с разрезом вдоль отрицательной полуоси; эту область мы обозначим буквой D (рис. 5). Так как на свободных поверхностях пластин давление равно постоянной, которую можно принять равной 0, то там $u = 0$. Мы получаем первое граничное условие задачи: 1) $\text{Re } f = 0$ на всей границе D . Далее должны выполняться следующие условия на бесконечности:

- 2) $u = \text{Re } f \rightarrow 0$ при $x \rightarrow \pm \infty$,
- 3) $v = -k \text{Im } f \rightarrow 0$ при $z \rightarrow A_2$ (т.е. при $x \rightarrow +\infty$), $v \rightarrow -|V_2|$ при $z \rightarrow A_3$ (т.е. при $x \rightarrow -\infty, y > 0$), $v \rightarrow |V_2|$ при $z \rightarrow A_1$ (т.е. при $x \rightarrow -\infty, y < 0$).

Для полного определения f потребуем еще условие:

- 4) в окрестности точки контакта

$$A_0 (z = 0) f(z) \approx \frac{A}{\sqrt{z}},$$

где A – некоторая постоянная.

Условия 1) – 4) позволяют определить функцию f . Для этого

отобразим область D конформно на верхнюю полуплоскость $\text{Im } \zeta > 0$; находим обратное к этому отображению и получаем выражение для функции:

$$\begin{aligned} f(z) &\approx iU \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right) \sqrt{\frac{2\delta_1\delta_2}{k\pi(\delta_1+\delta_2)}} \frac{1}{\sqrt{-z}} = \\ &= i \frac{UC}{\sqrt{-z}}. \end{aligned}$$

Согласно тому, что скорость метаема пластины

$$v = \frac{\partial y}{\partial t} = -\text{Im } k f(z),$$

следовательно, в окрестности точки контакта, находим

$$y = 2kC \sqrt{Ut - x}$$

или, в системе координат, связанной с точкой контакта,

$$y = 2kC \sqrt{-x},$$

$$\text{и } R = \frac{4}{\pi} \sqrt{1 - \frac{U^2}{c^2}} \delta_1 \cdot \sin\left(\frac{\gamma}{2}\right)^3$$

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 для длины волн, образующихся при сварке взрывом, когда метаема пластина много тоньше неподвижной. Волнообразование при сварке взрывом не следует рассматривать как проявление какой-либо неустойчивости. Более естественно считать, что здесь имеется некоторая автоколебательная система с жестким возбуждением. Для исследования распределения энергии в зоне соединения при сварке взрывом были поставлены специальные эксперименты. Для сварки подбирались специальные металлы, образующие при

соединении термопару, в частности никель и сталь. Обработка результатов этих экспериментов позволила прийти к следующему важному и интересному выводу. На границе зоны соударения, в весьма узком слое (примерно на порядок более тонком, чем зона волнообразования) с большой скоростью выделяется конечное количество тепла Q , составляющее примерно 3% от кинетической энергии метаема пластины. Остальная часть кинетической энергии метаема пластины выделяется более или менее равномерно во всем объеме и определяет конечную температуру пластин. Эта энергия, по-видимому, и является источником, поддерживающим автоколебательный процесс волнообразования при сварке взрывом. Процесс сварки можно рассматривать как обратный к процессу образования трещин, и поэтому выделение энергии при сварке 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 решёток за рубежом (см. «Промышленное применение сварки взрывом (обзор)», Бэнкер Дж., стр. 49–54, журнал «Автоматическая сварка», ноябрь 2009 г.). ●

KEY WORDS: *bimetal explosion welding, welding of metals by pulse loading, bimetallic billets.*



РФ, 109428, г. Москва, Рязанский проспект, д. 24, к.2
+7-495-2-680-680, +7(495) 669-93-35,
info@him-apparat.ru
http://www.him-apparat.ru