

Учебная дисциплина «Импульсные технологии»

Раздел III. Технологическое использование конденсированных ВВ.

Лекция 10. Сварка взрывом, история открытия, место среди традиционных способов сварки. Схема реализации, плоский, осесимметричный случай, конструкционная сварка. Области сварки различных металлов на плоскости V_k - γ (V_k -скорость точки контакта, γ -угол соударения).

История сварки взрывом [1]

В 20-ом веке, в основном после второй мировой войны, стал широко применяться способ ударно-волнового воздействия на материалы. Источником энергии, как правило, являются ВВ. Появился термин – обработка материалов взрывом. Он включает в себя сварку, штамповку, упрочнение, компактирование порошков взрывом и другие операции с применением ВВ. Можно считать, что в СССР обработка материалов взрывом началась в г. Киеве в 1944 - 1946 гг. во время работ по изучению кумуляции, проводившихся группой исследователей под руководством академика М. А. Лаврентьева [1]. Когда ставились опыты с двумя конусами, установленными соосно в полости кумулятивного заряда, были получены биметаллические песты из стали и меди с отчетливым волнообразованием.

Эти результаты в то время опубликованы не были и первой публикацией по сварке взрывом, как и вообще по металлообработке взрывом, считается [2].

длин тонкой, опущенной...
взрывом, упоминание о котором содержится в работе [145]. В

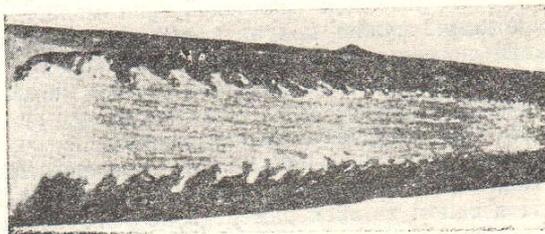


Рис. 3.1. Пест Лаврентьева.

Биметаллический пест
Лаврентьева

История сварки взрывом

В США исследования сварки взрывом начались в Стэнфордском исследовательском институте и в 1961г были опубликованы первые результаты (Davenport D.E., Duvall G.). В этом же году Абрахамсон (Abrahamson G.R.) опубликовал первую модель волнообразования . Надо сказать, что исследователи США тоже обнаружили явление образования прочного соединения металлических тел проводя опыты, связанные с кумуляцией и пробиванием преград. Сразу за открытием явления СВ исследования промышленной направленности начали проводиться в концерне du Pont de Nemours (Covan G., Douglas J, Holtzman A.H., патент 1960г.). Несколько позднее появились публикации исследователей, ставших широко известными (Crossland B., Williams J.D.).

В конце 50-х годов, уже возглавляя Сибирское отделение АН СССР и будучи директором Института гидродинамики, М.А.Лаврентьев в качестве одного из научных направлений Института выбрал обработку материалов взрывом. В 1962 г. и 1963г. вышли в свет первые в СССР статьи по сварке взрывом. Авторы-сотрудники Института гидродинамики СО АН СССР - В. С. Седых., А. А Дерibas., Е. И. Биченков, Ю. А Тришин и М. П. Бондарь [3,4].

История сварки взрывом

Начиная с 60-х годов число публикаций по СВ стало резко расти, это технологическое направление стало развиваться в различных организациях СССР (институт электросварки им. Е.О. Патона, Волгоградский политехнический институт, НПО «Прометей», НПО «Анитим» и др.). В Институте гидродинамики существенный вклад в научные исследования и прикладные разработки, кроме указанных выше, внесли сотрудники: Симонов В.А., Захаренко И.Д., Мали В.И., Яковлев И.В., Пай В.В., Оголихин В.М., Злобин Б.С. И ряд других.

Для подробного изучения СВ можно воспользоваться книгами [1, 5, 6, 7, 8].

Сварка взрывом среди других способов соединения металлов

К настоящему времени сварка взрывом (СВ) заняла прочное место среди других технологий соединения металлов, таких как сварка плавлением, сварка трением, сварка давлением, совместная прокатка (СП), диффузионная сварка и т.д.

Главное преимущество СВ – это возможность относительно просто создавать прочное соединение по большой площади (сварка больших листов по плоскости, труб по цилиндрической поверхности). Другие технологии (кроме совместной прокатки) не дают возможности сделать это, поэтому СВ быстро и успешно заняло свою нишу в области производства биметаллов.

СВ по сравнению с СП позволяет сваривать более широкий спектр пар металлов и сплавов без дополнительных ухищрений (вакуумирование, предварительный нагрев, тщательная подготовка поверхностей). Кроме того СВ можно плакировать толстые листы, в то время как для СП соответствующее оборудование отсутствует.

Схемы сварки взрывом [8]

Плоская геометрия

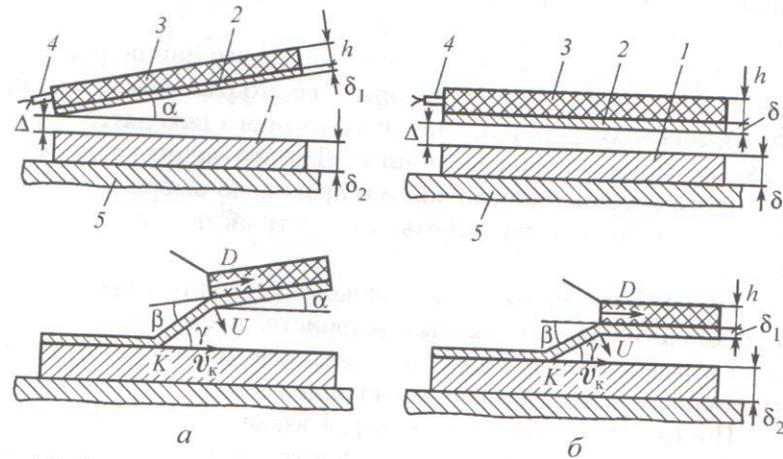


Рис. 4.1. Схемы сварки взрывом:

a — расположение свариваемых пластин под углом друг к другу; *б* — параллельное расположение пластин; 1 — неподвижная пластина; 2 — метаемая пластина; 3 — метаемый заряд ВВ; 4 — система возбуждения детонации; 5 — основание

Схемы сварки взрывом [8]

Цилиндрическая геометрия

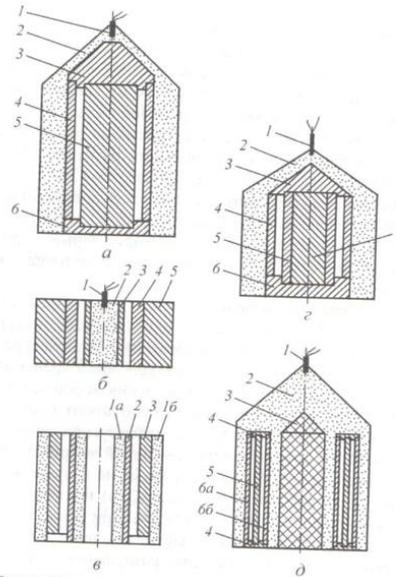


Рис. 4.2. Схемы сварки взрывом осесимметричных заготовок:

a — схема плакирования наружной поверхности стержня: 1 — электродетонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — конус; 4 — метаемая (плакирующая) оболочка; 5 — плакируемый стержень; 6 — центрирующая крышка; *б* — схема плакирования внутренней поверхности трубчатой заготовки: 1 — электродетонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — метаемая оболочка; 4 — плакируемая трубчатая заготовка; 5 — прочная матрица; *в* — схема плакирования внутренней поверхности трубчатой заготовки большого диаметра: 1*a* — метающий заряд ВВ; 1*б* — дополнительный заряд ВВ, компенсирующий действие внутреннего заряда ВВ; 2 — метаемая оболочка; 3 — плакируемая трубчатая заготовка; *г* — схема плакирования наружной поверхности трубчатой заготовки: 1 — электродетонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — конус; 4 — метаемая оболочка; 5 — плакируемая трубчатая заготовка; 6 — центрирующая крышка; 7 — стержень, предотвращающий схлопывание трубчатой заготовки; *д* — схема двустороннего плакирования трубчатой заготовки: 1 — электродетонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — конус; 4 — центрирующие крышки; 5 — плакируемая трубчатая заготовка; 6*a* и 6*б* — плакирующие оболочки

Метание тел зарядом ВВ

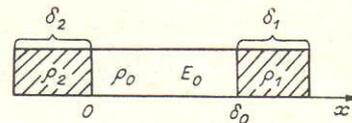
Р. Гарни (Garney R.W.) исследовал разлет осколков гранат и предложил в 1943г. одномерный подход для оценки их скорости.

Упрощающие предположения:

- 1) Детонация мгновенная, плотность ПД равна ρ_0
- 2) Метаемые тела мгновенно разгоняются до скоростей V_1 и V_2
- 3) Распределение скоростей в ПД зависит от координаты x линейно

$$V(x) = -V_2 + x(V_1 + V_2) / \delta_0$$

Рис. 1.1. Одномерная схема Гарни.



считать показатель адиабаты продуктов взрыва величиной переменной, зависящей от параметров движения, станет очевидным, что задача о метании тел продуктами взрыва в общей постановке достаточно сложна. Поэтому для получения расчетных

Метание тел зарядом ВВ

Тогда для двух неизвестных V_1 и V_2 имеем 2 уравнения из законов сохранения импульса и энергии

$$\rho_1 \delta_1 V_1 - \rho_2 \delta_2 V_2 + \rho_0 \int_0^{\delta_0} V(x) dx = 0$$

$$\rho_0 \delta_0 E_0 = \frac{\rho_2 \delta_2 V_2^2}{2} + \frac{\rho_1 \delta_1 V_1^2}{2} + \frac{\rho_0}{2} \int_0^{\delta_0} V^2(x) dx$$

Метание тел зарядом ВВ

Проинтегрировав уравнения и введя обозначения

$$r_1 = \frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_1 \delta_1} \qquad r_2 = \frac{\rho_0 \delta_0}{\rho_2 \delta_2}$$

Получим

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{r_2}{r_1} \cdot \frac{(r_1 + 2)}{(r_2 + 2)} = \eta \qquad \frac{V_1^2}{E_0} = \frac{2}{\left(\frac{\eta^2}{r_2} + \frac{1}{r_1} + \frac{(1+\eta)^2}{3} - \eta \right)}$$

Если масса одного из тел (2-го) равна нулю, то $r_2 \rightarrow \infty$ и получаем

$$\frac{V_1^2}{E_0} = \frac{6r_1^2}{r_1^2 + 5r_1 + 4} \qquad E_0 = \frac{D^2}{2(k^2 - 1)} \qquad E_0 - \text{энергия Гарни}$$

Двумерный случай

Метание пластины зарядом ВВ [1]

$$\beta = \frac{cr}{r + 2.71 + 0.184 / y}$$

$$y = h / \delta_e$$

$$r = m_e / m_p$$

$$V_p = 2D \sin(\beta / 2)$$

$$c = \frac{\pi}{2} \left(\sqrt{\frac{k+1}{k-1}} - 1 \right)$$

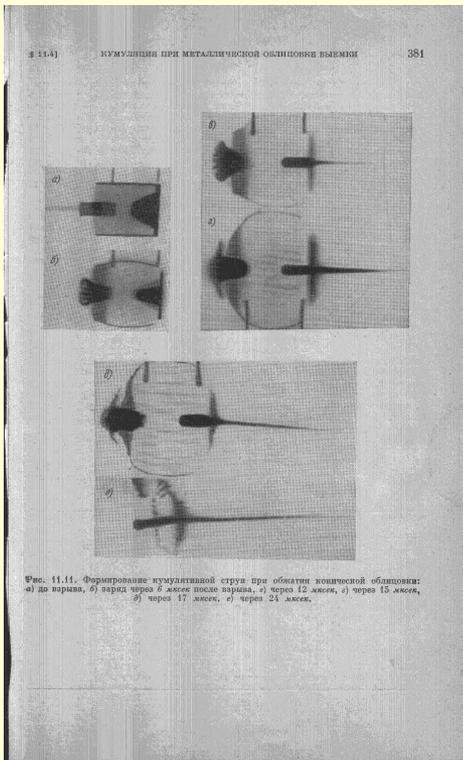
$$\gamma = \beta + \alpha$$

$$V_c = D \frac{\sin \beta}{\sin \gamma}$$

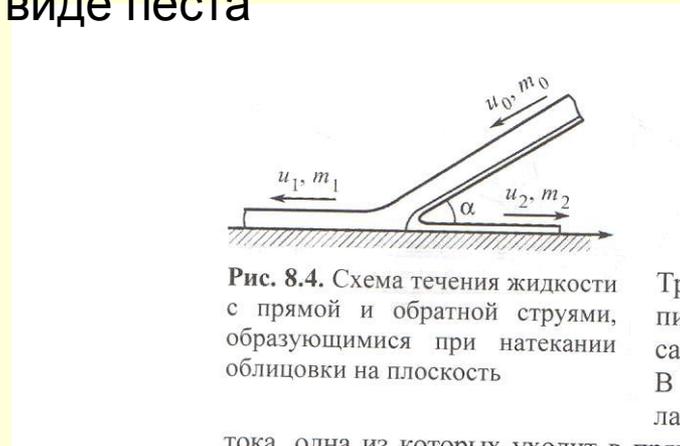
$k = 2.8; 2.5; 2.2$ соответственно для гексогена, аммонита 6ЖВ и смеси аммонита 6 ЖВ с аммиачной селитрой 50/50. Отсюда $c = 0.71, 0.83$ и 0.99 для перечисленных ВВ в том же порядке.

Гидродинамическая модель кумуляции [8, 9]

Для физического описания столкновения пластин удобно применить гидродинамическую модель кумуляции (М. А. Лаврентьев).



Материал облицовки
переходит частично в
струю, частично
остается в виде песта



Схлопывание металлической облицовки представляется как соударение струй в системе координат движущейся точки соударения.

Описание соударения струй

$$m_0 = m_1 + m_2$$

Сохранение массы

$$\frac{m_0 u_0^2}{2} = \frac{m_1 u_1^2}{2} + \frac{m_2 u_2^2}{2}$$

Сохранение энергии

$$m_0 u_0 \cos \gamma = m_1 u_1 - m_2 u_2$$

Сохранение импульса

$$p_0 + \frac{\rho u_0^2}{2} = p_1 + \frac{\rho u_1^2}{2} = p_2 + \frac{\rho u_2^2}{2}$$

Уравнение Бернулли

m_0 , m_1 , m_2 – массовый расход жидкости соответственно в натекающей, прямой и обратной струях. Система координат связана с движущейся точкой контакта, γ - угол между струей и плоскостью симметрии.

Формулы для песта и кумулятивной струи

Т.к. вдалеке от точки соударения струй $p_0 = p_1 = p_2 = 0$, то $u_0 = u_1 = u_2$. Отсюда и из закона сохранения импульса следует:

$$m_1 = \frac{m_0(1 + \cos\gamma)}{2} = m_0 \cos^2(\gamma / 2) \quad \text{Масса песта}$$

$$m_2 = \frac{m_0(1 - \cos\gamma)}{2} = m_0 \sin^2(\gamma / 2) \quad \text{Масса кумулятивной струи}$$

При угле $2\gamma = 60$ град в струю переходит 6,7% массы кумулятивной облицовки.

Скорости песта и струи в лабораторной системе координат

Скорость точки контакта (точки схождения струй) в лабораторной системе координат есть

$$u_0 = u_1 = u_2 = \frac{V_p}{\operatorname{tg}\gamma}$$

Скорости струй $u_0 = u_1 = u_2 = \frac{V_p}{\operatorname{tg}\gamma}$

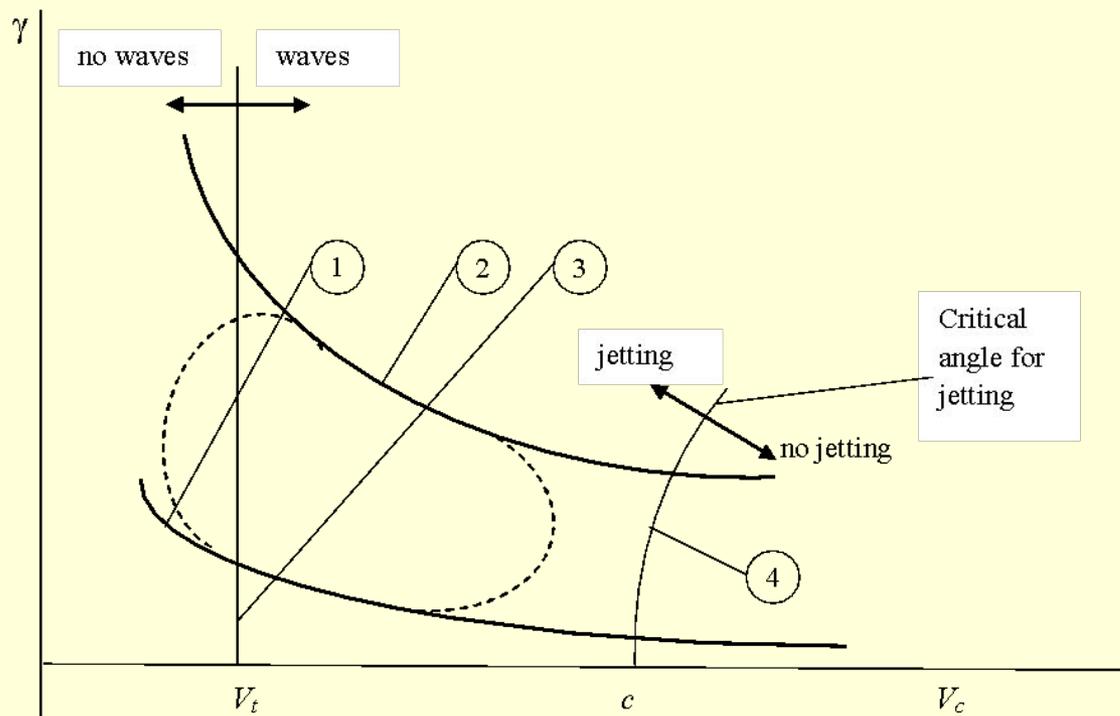
Тогда скорости песта и струи в лабораторной системе координат

$$V_1 = -u_1 + V_c = V_p \operatorname{tg}(\gamma / 2) \quad V_2 = u_2 + V_c = V_p / \operatorname{tg}(\gamma / 2)$$

При скорости облицовки 2 км/с и $2\gamma = 60$ град $V_1 = 0.54$ км/с, $V_2 = 7.5$ км/с.
Отношение кинетической энергии струи к энергии песта

$$\frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{\operatorname{tg}^2(\gamma / 2)} \quad \text{Для } 2\gamma = 60 \text{ град это соотношение равно } 13,9.$$

Область сварки на плоскости $V_c - \gamma$



1- нижняя граница, 2- верхняя граница, 3- граница $V_c = V_t$ между областями с гладкой и волнообразной границей зоны соединения (V_t находится экспериментально), 4- граница между областями с наличием или отсутствием кумулятивной струи (потока частиц), струя не возникает, если V_c превышает c); V_c – скорость точки контакта, γ – угол соударения, c – скорость волны сжатия ($c^2 = K/\rho$, K - модуль объемного сжатия, $K = E/3(1-2\mu)$, E - модуль Юнга, μ - коэффициент Пуассона). Пунктирная кривая и линии 1, 2 ограничивают типичную экспериментально получаемую область надежной сварки.

Расчет нижней и верхней границ области сварки [1, 10]

$$\gamma = k \sqrt{\frac{H_V}{\rho_m V_c^2}} \quad k = 5.5 \cdot \xi^{0.18}$$

$$\sin(\gamma / 2) = 14.7 \cdot V_c^{-5/4} \sqrt{\frac{T_m(\lambda / a)}{(\rho_m \delta_2 \delta_1^2) / (\delta_1 + \delta_2)}} \quad a^2 = \lambda / (\rho_m C)$$

ξ – отношение толщины окисной пленки к толщине метаемой пластины. На практике k обычно меняется от 0.6 до 1.2, для материалов с естественной оксидной пленкой берется $k = 1.14$.

H_V – твердость металла по Виккерсу; V_c – скорость точки контакта; ρ_m – плотность металла; T_m – температура плавления; λ – теплопроводность; a – температуропроводность; δ_1 – толщина метаемой пластины; δ_2 – толщина неподвижной пластины; C – теплоемкость металла.

Примеры области сварки

медь-медь

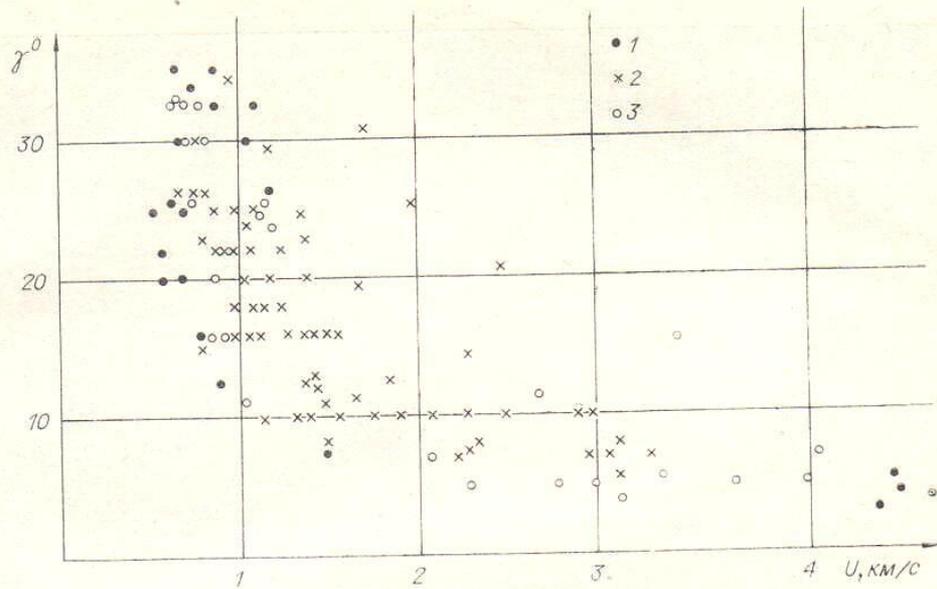


Рис. 3.46. Область сварки медь + медь (1 — нет сварки; 2 — прочная сварка; 3 — частичная).

поп. требуемым углом. В работе [231] использовалось метание

Примеры области сварки

ст3 – нерж. сталь

Величина порошка $\approx 100\text{ мк}$, минимальная температура $\approx 1500^\circ\text{С}$. Кроме того, здесь отчетливо просматривается зона отсутствия сварки при углах, больших 20° . В этом случае наблюдается ситуация, когда μεταемая пластина, нержавеющей стали «срезается», оставляя материал во впадинах волн (рис. 3.48). В ряде других сочетаний это явление не наблюдается, и причины его в настоящее время не ясны. На

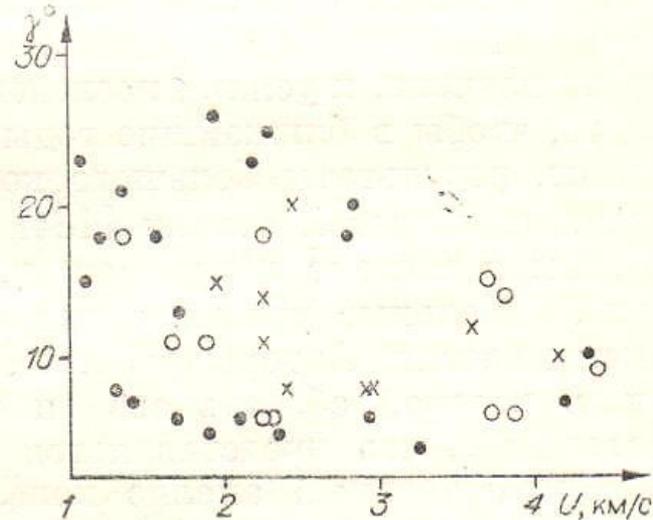
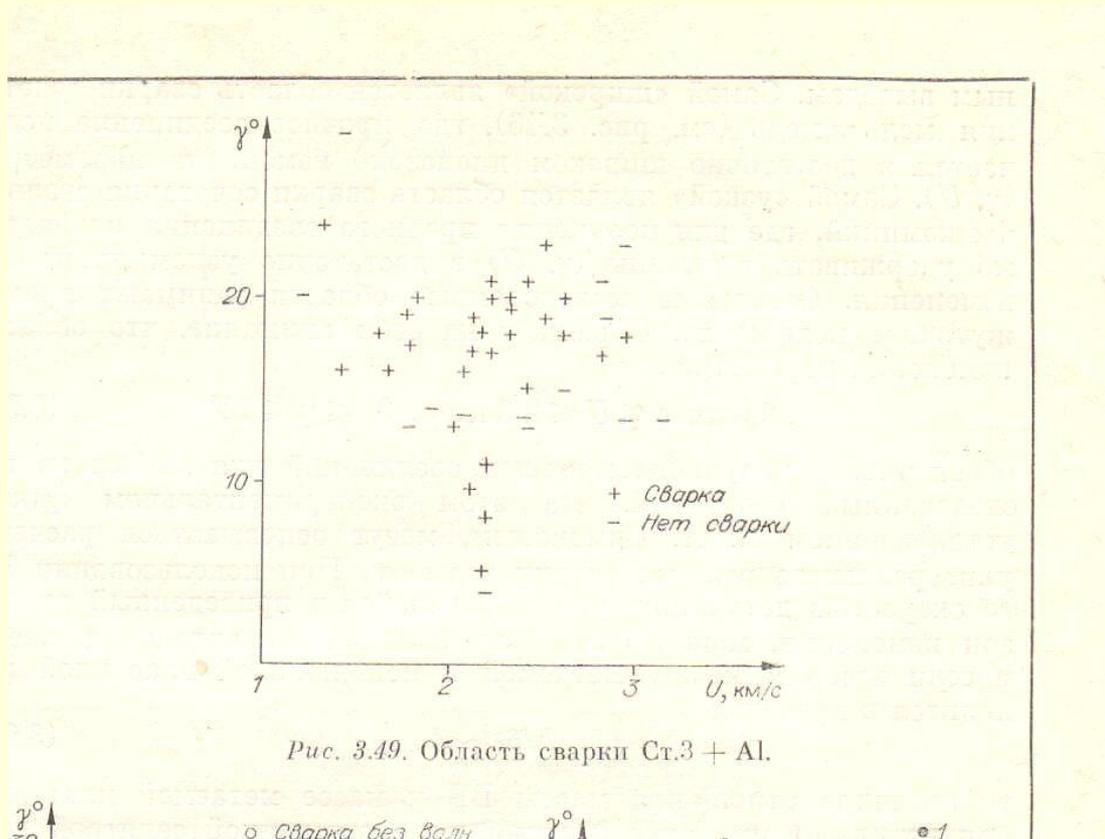


Рис. 3.47. Область сварки Ст.3+сталь 1X18Н9Т (обозначения те же, что на рис. 3.46).

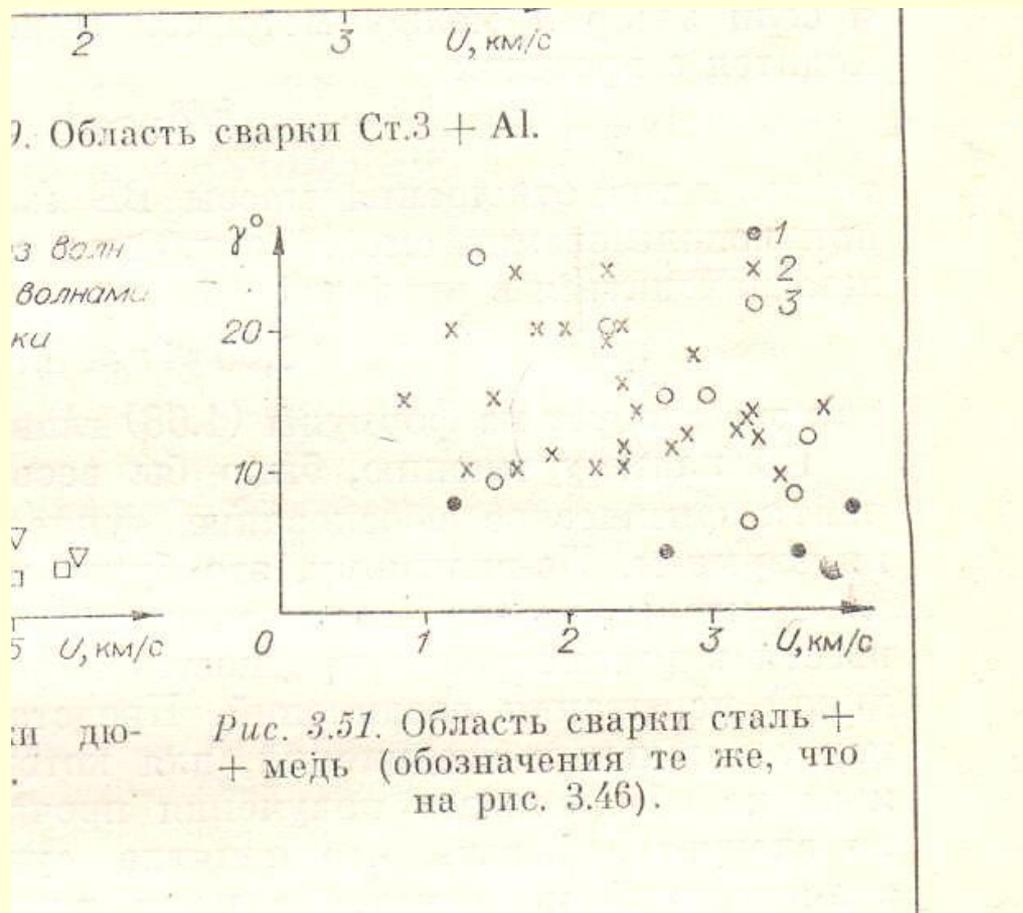
Примеры области сварки

ст 3 - алюминий



Примеры области сварки

ст 3 - медь



Примеры области сварки ст 3 - титан

Рис. 3.50. Область сварки дю-
раль + дюраль [296].

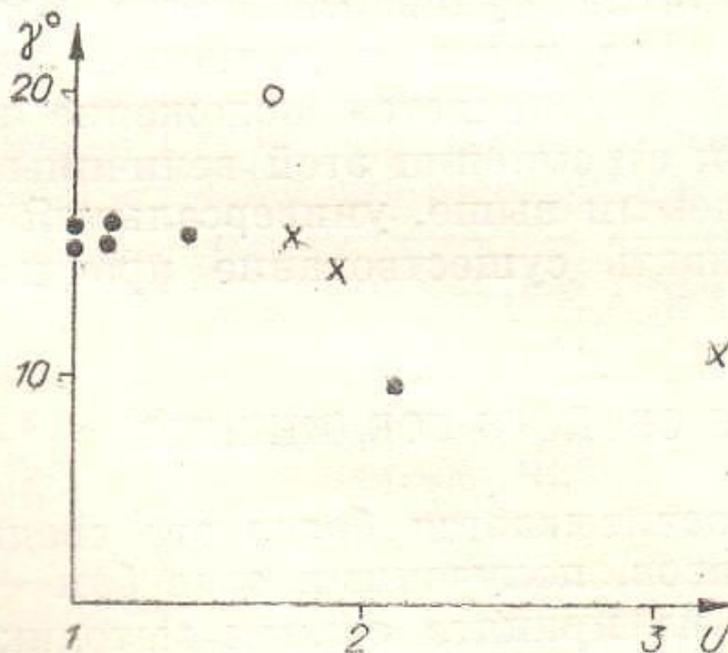


Рис. 3.51. Область сварки
+ медь (обозначения те же, что
на рис. 3.46).

Рис. 3.52. Область сварки
сталь + титан (обозначения те же, что на
рис. 3.46).

Зависимость D от толщины заряда δ

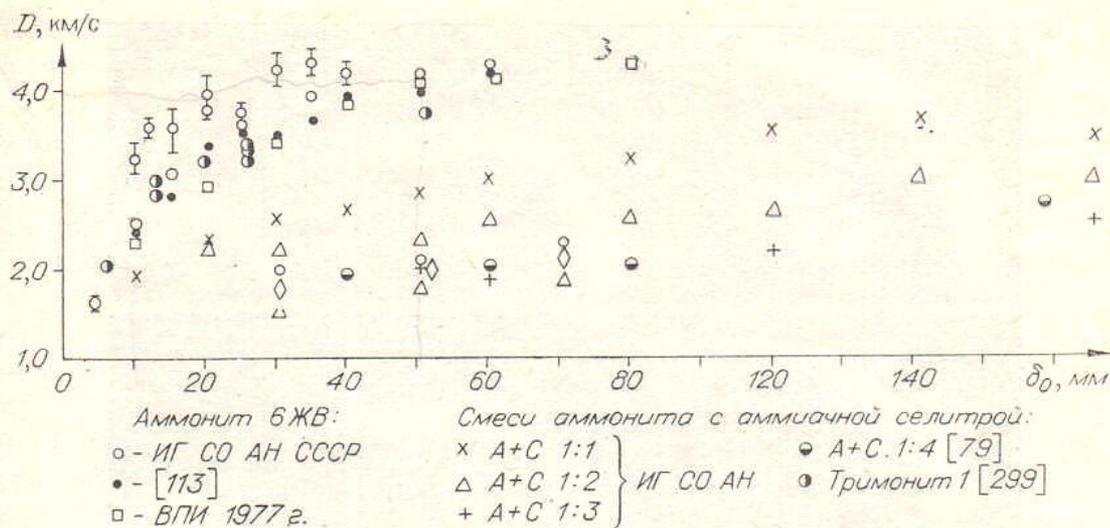


Рис. 0.1. График скорости детонации от толщины слоя для тримонита и других ВВ.

Пример расчета параметров СВ

Задача: плакировать сталь алюминиевым листом толщ. 10 мм.

Из области сварки выбираем режим $\gamma = 15$ град, $D = 2.5$ км/с.

Для работы берем смесь аммонит 6ЖВ+АС 50/50. Схема сварки параллельная, т.е. угол соударения $\gamma =$ углу поворота β . По формуле

$r = 2,71\beta/(c-\beta)$ находим $r = m_e/m_p = 0,97 \approx 1$ ($c = 0.99$). Далее рассчитываем толщину заряда $\delta_e = \delta_p \rho_p / \rho_e = 10 \cdot 2.7 / 0.8 = 34$ мм.

Проблемы создает зависимость D от толщины заряда $ВВ$ и существование критической толщины заряда. Приходится под заданную толщину и материал метаемой пластины подбирать состав $ВВ$ и, соответственно, измерять зависимость $D(\delta_e)$ для разных смесей. Желательно иметь $ВВ$ со скоростью детонации в диапазоне 1,5 – 3 км/с не зависящей от толщины заряда. Кроме того, для плакирования тонкими металлическими слоями желательно иметь критическую толщину как можно меньше.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дерибас А.А. Физика упрочнения и сварки взрывом. - Новосибирск: Наука, 1980.
2. Carl L.R. Brass welds made by detonation impulse // Metal progress. 1944. Vol. 46, No. 1. P. 102-103.
3. Седых В.С., Дерибас А.А., Биченков Е.И., Тришин Ю.А. Сварка взрывом // Сварочное производство. 1962. № 5. С.3-6.
4. Седых В.С., Бондарь М.П. Основные параметры сварки взрывом и прочностные характеристики сварных соединений // Сварочное производство. 1963. №2. С.1-5.
5. V. C r o s s l a n d, Explosive welding of metals and its Application, New York: Oxford University Press 1982.
6. Захаренко И.Д. Сварка металлов взрывом. – Минск: Наука и техника, 1990.
7. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. – М.: Машиностроение, 2005
8. В.В. Селиванов, И.Ф. Кобылкин, С.А. Новиков. Взрывные технологии, под общ. ред. В.В. Селиванова. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008.
9. Ф.А.Баум, Л.П. Орленко, К.П. Станюкович и др. Физика взрыва, монография под ред. К.П. Станюковича, изд. 2-е, перераб. М.: Наука, 1975
10. И.Д. Захаренко, В.В. Киселев. Влияние толщины оксидной пленки на положение нижней границы области сварки взрывом // Сварочное производство. 1985, № 9.