

УДК 621.791.76:621.7.044.2

Параметры математической модели высокоскоростного соударения металлических пластин при сварке взрывом

© 2011 Е.С.Арестов, В.П.Багмутов, С.В.Кузьмин, В.И.Лысак, А.В.Севостьянова

Волгоградский государственный технический университет

E-mail: weld@vstu.ru; sopromat@vstu.ru; lysak@vstu.ru

Поступила в редакцию 28 декабря 2010 г., окончательный вариант — 5 мая 2011 г.

Проанализировано влияние настроечных коэффициентов кинематической модели сварки взрывом на выходные параметры модели. На основании экспериментальных данных по сварке взрывом металлических пластин сталь–сталь и Al–Al определены зависимости этих коэффициентов от условий проведения сварки взрывом.

Ключевые слова: сварка взрывом, многослойные композиты, скорость соударения, начальная стадия разгона, послойное соударение.

Effects of fitting coefficients in kinematic model of explosion welding on the output parameters of the model are analyzed. On the base of experimental data on explosion welding of steel–steel and Al–Al plates, dependencies of these coefficients on the welding conditions have been determined.

Keywords: explosion welding, multilayer composites, impact velocity, starting stage of acceleration, layer-by-layer impact.

Введение

При сварке взрывом многослойных композиционных материалов по схеме, представленной на рис.1, актуальной является задача достоверного определения послойных скоростей соударения V_{ci} пластин на всех межслойных границах [1]. Нестационарность разгона и соударения отдельных элементов свариваемого пакета пластин является существенным препятствием для создания универсальной и достоверной математической модели. К настоящему времени предложены различные методики расчета V_{ci} [2-5], среди которых можно выделить кинематическую модель [5], адекватно отражающую особенности процесса и хорошо согласующуюся с экспериментальными данными.

В соответствии с [5], разгон пакета пластин после каждого акта соударения происходит в две стадии. На

первой, начальной стадии происходит передача импульса от метаемой пластины к неподвижной, и за время ее протекания скорость полета пластины за короткое время возрастает от нуля до значения, определяемого законом сохранения импульса. На второй, конечной стадии ускорение пакета сваренных пластин обусловлено лишь действием остаточного давления продуктов детонации.

Для описания изменения скорости полета пакета пластин на начальной стадии разгона, а также определения ее продолжительности, в работе [6] была предложена модель, основанная на предположении о постепенном (не мгновенном) вовлечении в процесс соударения массы ударяемой пластины во время переходного периода, когда ударяющая пластина замедляется, а ударяемая — ускоряется.

Основные расчетные зависимости модели представлены формулами, по которым можно

рассчитать текущую скорость перемещения тыльной поверхности ударяемой пластины V_{i+1} и длительность начальной стадии разгона τ_H :

$$V_{i+1} = \frac{V_i(\tau_0) \left[\frac{1}{p_{0i}} \int_0^{\bar{\tau}_j} p_{\text{вн}}(\bar{\tau}) d\bar{\tau} + \int_0^{\bar{\tau}_j} (1 - \bar{\tau}^k)^v d\bar{\tau} \right]}{1 + \frac{m_{i+1}}{M_i} \left[1 - (1 - \bar{\tau}^k)^v \right]^n \int_0^1 (1 - \bar{\tau}^k)^v d\bar{\tau}}, \quad (1)$$

$$\tau_H = \tau_K - \tau_0 = \frac{M_i V_i(\tau_0)}{p_{0i} \int_0^1 (1 - \bar{\tau}^k)^v d\bar{\tau}}, \quad (2)$$

где M_i — удельная масса системы сваренных в полете ударяющих пластин; m_{i+1} — удельная масса ударяемой пластины; τ_0 — момент соударения ударяющей и ударяемой пластин; $\bar{\tau} = \frac{\tau - \tau_0}{\tau_K - \tau_0}$ — приведенное время начальной стадии разгона; τ_K — продолжительность начальной стадии разгона; p_{0i} — максимальное контактное давление; $p_{\text{вн}}$ — внешнее давление продуктов детонации на поверхность метаемой пластины; $V_i(\tau_0)$ — скорость i -ой пластины в момент времени τ_0 [1]; $\tau_j \in [0; 1]$ — фиксированные относительные времена; $j=1, \dots, N$; N — количество экспериментальных значений скорости соударения $V_{i+1,j}^{\text{эксп}}$ на $i+1$ границе.

Внешнее давление продуктов детонации и величина максимального контактного давления в зоне соударения рассчитываются как

$$p_{\text{вн}} = \frac{64}{27} P_H \left(\frac{H}{D\tau} \right)^3,$$

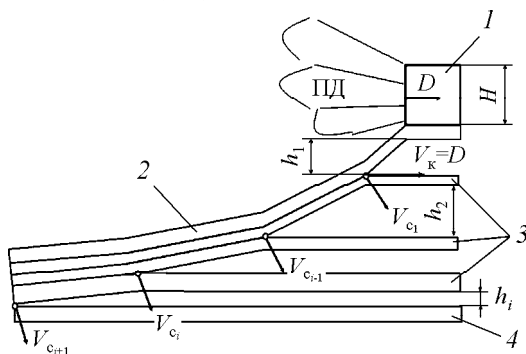


Рис.1. Схема соударения пластин при одновременной сварке взрывом [1]; 1 — заряд ВВ; 2, 3, 4 — метаемая, промежуточные и неподвижная пластины соответственно; D — скорость детонации ВВ; V_K — скорость точки контакта; ПД — продукты детонации; H — высота заряда ВВ; h_i — установочные зазоры; V_{ci} — послынные скорости соударения.

$$p_H = \frac{1}{4} \rho_0 D^2,$$

$$p_{0i} = \frac{\rho_1 c_{01} \rho_2 c_{02}}{\rho_1 c_{01} + \rho_2 c_{02}} V_i,$$

где p_H — давление на фронте детонационной волны; ρ_0 — плотность взрывчатого вещества; ρ_1, ρ_2 — плотность металла метаемой и неподвижной пластины соответственно; D — скорость детонации взрывчатого вещества; H — высота заряда взрывчатого вещества; c_{01}, c_{02} — скорость звука в металле метаемой и неподвижной пластины соответственно.

В модель входят четыре свободных параметра — настроечные коэффициенты k, n, χ и v . Первая пара коэффициентов (k и n) характеризует интенсивность нарастания присоединяемой к ударяемой пластине массы, от значений коэффициентов χ и v зависит длительность начальной стадии τ_H . От соотношения коэффициентов k и n зависит интенсивность ускорения пакета на начальной стадии, величина χ определяет интенсивность спада контактного давления на текущей границе соударения.

Целью данной работы является установление количественных соотношений между значениями коэффициентов расчетной модели и условиями сварки взрывом металлических пластин.

Методика эксперимента

Эксперименты по сварке взрывом пакета, собранного из двух пластин 3 и 4 (сталь Ст3 или алюминий АД0) проводили по схеме, представленной на рис.2. Под нижней пластиной под некоторым углом к ее поверхности устанавливали реостатный датчик 5 в виде тонкой нихромовой проволоочки, к которому через согласующее сопротивление подключали генератор тока ГТ и цифровой запоминающий осциллограф ОСЦ. По осциллограмме (рис.3), фиксирующей изменение во времени падения напряжения на проволоочном датчике на стадии разгона, по методике [7] рассчитывался профиль тыльной поверхности ударяемой пластины в координатах “ x – y ” и строились кривые разгона второй пластины пакета в координатах “скорость полета – время” (рис.4, кривая 2). При размещении реостатного датчика под метаемой пластиной аналогичным образом строилась кривая разгона метаемой пластины (рис.4, кривая 1). Время τ_0 на рис.4 соответствует моменту соударения первых двух пластин пакета.

Длительность начальной стадии разгона пакета из двух сваренных в полете пластин определялась

точкой пересечения расчетной 3 и экспериментальной 2 кривых на рис.4.

В экспериментах варьировалась толщина свариваемых элементов δ_1 и δ_2 (метаемой и неподвижной

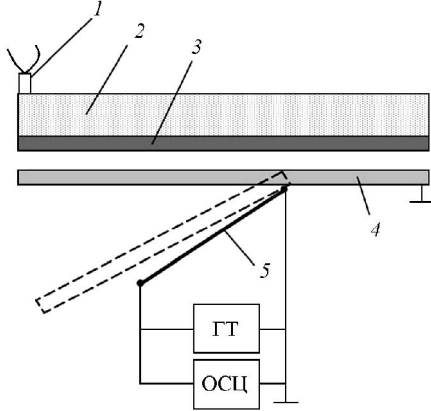


Рис.2. Схема проведения эксперимента: 1 — электродетонатор; 2 — заряд ВВ; 3 — метаемая (ударяющая) пластина; 4 — неподвижная (ударяемая) пластина; 5 — датчик (нихромовая проволока); ГТ — генератор тока; ОСЦ — осциллограф.

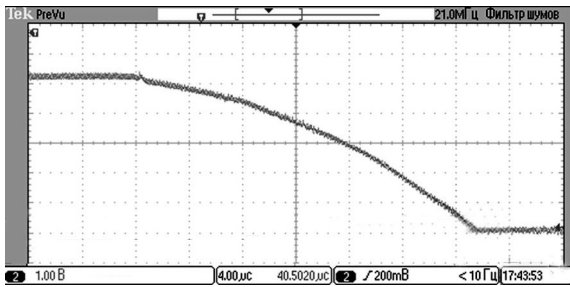


Рис.3. Типичная осциллограмма процесса разгона ударяемой пластины.

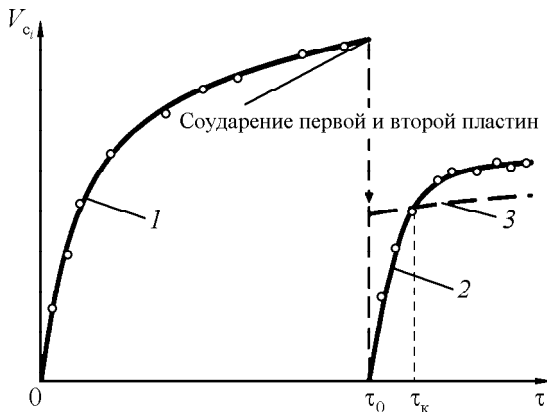


Рис.4. Кинетика разгона трехслойного пакета алюминиевых пластин: 1 — кривая разгона метаемой пластины; 2 — начальный участок разгона пакета из двух сваренных пластин; 3 — скорость пакета, рассчитанная из закона сохранения количества движения.

пластин двухслойного пакета соответственно) и фаза разгона (отношение h_1/H), которая характеризует величину остаточного давления продуктов детонации на поверхность метаемой пластины.

Методика расчета

Описанная в [8] методика определения коэффициентов k, n, χ и ν (обозначенных в [8] как $a_q, q=1, 2, 3, 4$) по экспериментальным значениям $V_{i+1}^{эксп}$

$$a_q^{(s)} = a_q^{(s-1)} + \alpha_q, (s=1, 2, \dots) \tag{3}$$

основана на итерационной процедуре поиска поправок α_q к параметрам a_q , определенным на предыдущем шаге итерации s , минимизирующих степень отклонения $\{\epsilon_j\}$ расчетных значений от экспериментальных данных, полученных при текущей скорости V_{i+1} и времени разгона τ_n ударяемой $i+1$ пластины. По полученным данным формировалась система уравнений, которая приближенно решалась методом наименьших квадратов.

Важным моментом в анализе корректности поставленной задачи по определению $\{a_q\}$ является проверка на единственность решения по τ_n и устойчивость основных функций V_{i+1}, τ_n по входным данным (то есть $\{a_q\}$). Для этого начальные значения $a_q^{(0)}$ задавались двумя способами: во-первых, путем использования расчетной зависимости (1) для $V_{i+1}^{расч}$ и четырех экспериментальных значений $V_{i+1}^{эксп}$ и, во-вторых, через определение первоначальных значений χ и ν по формуле (2) и экспериментальным значениям $\tau_n^{эксп}$ с дальнейшим их уточнением в рамках базовой процедуры, основанной на экспериментальных данных $V_{i+1}^{эксп}$.

Анализ (1), (2) на устойчивость во всем возможном диапазоне исходных данных (рис.5) показывает непрерывность функции $\tau_n(\chi, \nu)$ в широком интервале

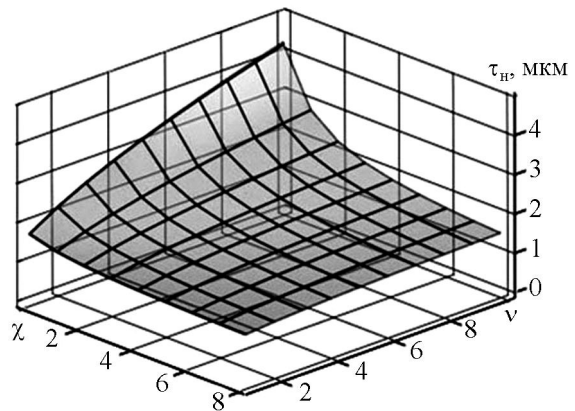


Рис.5. Влияние коэффициентов χ и ν на длительность начальной стадии разгона.

Аппроксимирующие функции для коэффициентов $\{a_q\}$		
Коэффициенты	Сталь+Сталь	Al+Al
K	$-8,5 \frac{h_1}{H} + 0,28\delta_{\Sigma} + 2,4$ при $\delta_{\Sigma} \in [4;7]$, $26,3\delta_{\Sigma} + 3,68 \frac{h_1}{H}$ при $\delta_{\Sigma} \in (7;11]$	$-0,175 \frac{h_1}{H} - 0,025\delta_{\Sigma} + 2,3$ при $\delta_{\Sigma} \in [4;7]$
n	~ 10	~ 8
χ	$2 \frac{h_1}{H} + 0,4\delta_{\Sigma}$	$1,6 \frac{h_1}{H} + 0,5\delta_{\Sigma} + 0,6$
ν	~ 1	~ 1

изменения параметров χ , ν (1;10], демонстрируя устойчивость определения искомых значений τ_n (аналогично и для V_{i+1}) от выходных данных $\{a_q\}$.

На основе имеющегося массива экспериментальных данных по V_{i+1} и τ_n были изучены закономерности изменения параметров a_q для стальных и алюминиевых пластин в зависимости от суммарной толщины ударяющего пакета пластин δ_{Σ} и фазы разгона h_1/H , а также степень влияния a_q на выходные параметры модели соударения (1), (2). При формировании результирующих зависимостей для a_q принималась во внимание не только точность

аппроксимации имеющихся эмпирических данных, но и ряд других факторов, например, сложность аппроксимирующей функции, внутренняя размерность задачи и др.

Результаты и обсуждение

Для удобства применения модельных соотношений (1), (2) в инженерной практике желательно использовать наиболее простые аппроксимации зависимостей $a_q = a_q(\delta_{\Sigma}, h_1/H)$ с минимальным количеством настроечных коэффициентов a_q и числом

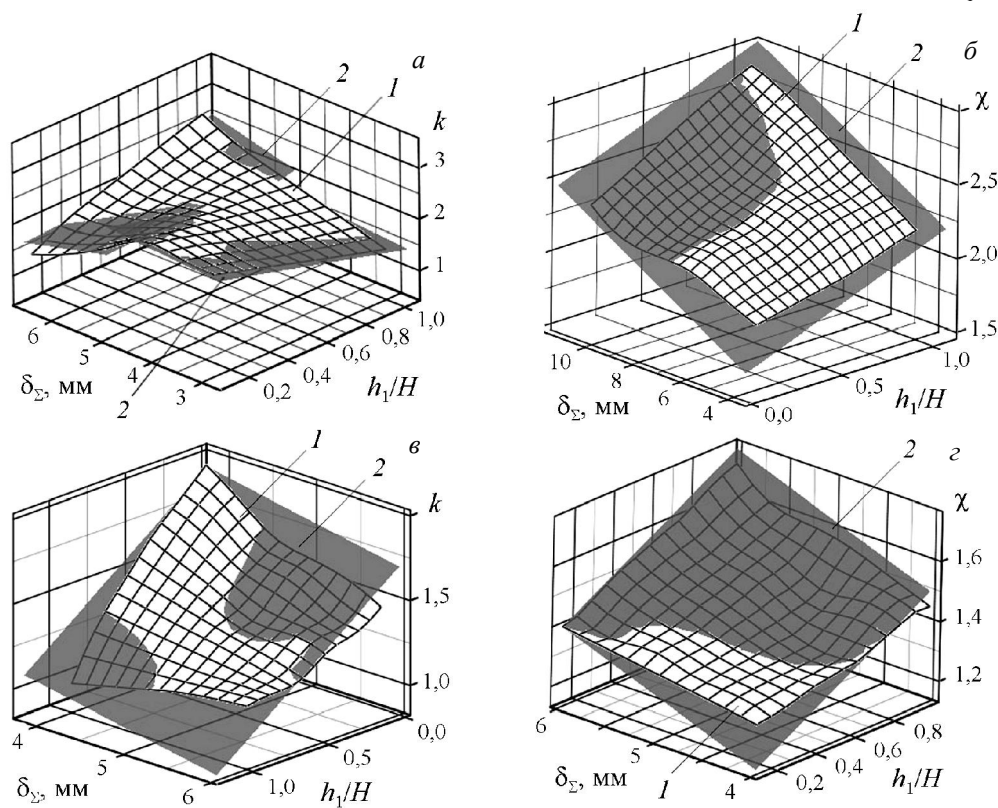


Рис.6. Влияние исходных условий сварки взрывом на настроечные коэффициенты модели: а, б — композиция сталь+сталь; в, г — композиция алюминий+алюминий. 1 — исходный вариант аппроксимации; 2 — упрощенные варианты аппроксимации с использованием функций $\{a_q\}$.

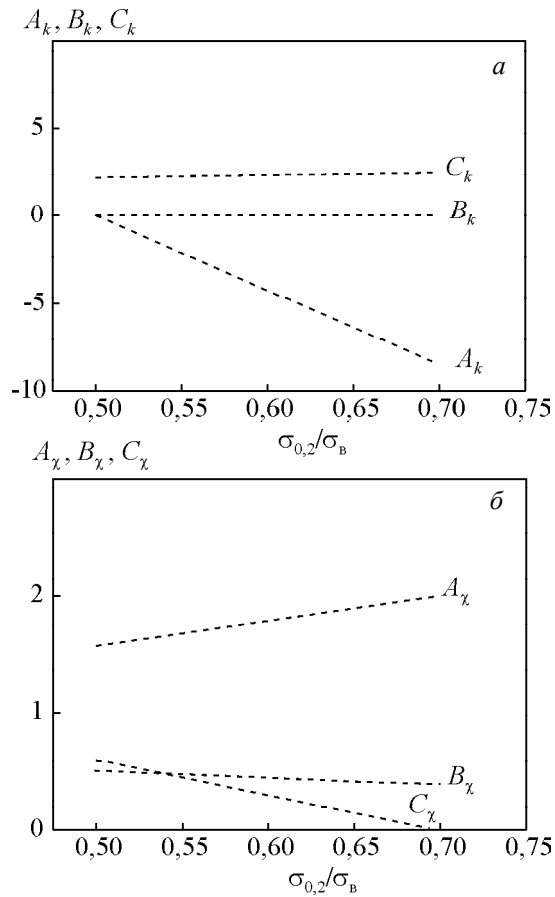


Рис.7. Зависимость коэффициентов аппроксимирующих функций $\{a_q\}$ от механических свойств свариваемых пластин.

необходимых экспериментов. Исследования показали, что достаточно сложные функции $a_q = a_q(\delta_\Sigma, h_1/H)$ можно заменить уравнениями вида $\{a_q\} = Ax + By + C$, где $x = h_1/H$, $y = \delta_\Sigma$.

Аппроксимирующие функции для композиций сталь+сталь и алюминий+алюминий приведены в Таблице. Коэффициенты в этих уравнениях для заданных областей изменения управляющих параметров являются единственными, что, однако, не исключает возможность выбора других аппроксимирующих уравнений, удовлетворяющих заданной точности эксперимента.

Как видно, коэффициенты n и ν в этих уравнениях остаются постоянными при любых значениях аргументов $x = h_1/H$ и $y = \delta_\Sigma$, вид соответствующих функциональных зависимостей k и χ для разных композиций и вариантов аппроксимации представлен на рис.6.

На рис.7 приведены зависимости коэффициентов A , B , C в упрощенных линейных аппроксимирующих уравнениях для k и χ от механических характеристик

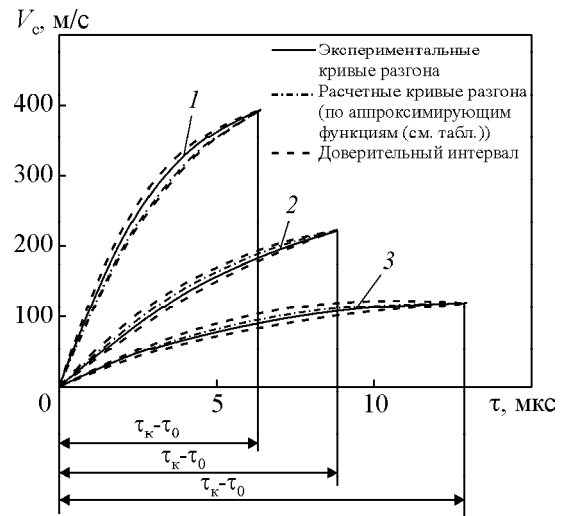


Рис.8. Кривые разгона пакетов взаимодействующих в полете металлических пластин (кривая разгона метаемой пластины не показана), рассчитанные с помощью функций $\{a_q\}$ с привлечением экспериментальных данных, полученных при сварке взрывом при следующих режимах: $D=2500$ м/с, $H=25$ мм, $h_1=3$ мм. Пакеты стальных пластин толщиной 2+2 мм (1), 2+4 мм (2) и 2+9 мм (3).

свариваемых материалов $\sigma_{0,2}/\sigma_B$. Как видно, при изменении пластичности свариваемых материалов изменяется и характер влияния фазы разгона (коэффициент A), а также некоторых других факторов (свободный коэффициент C) на процесс их высокоскоростного взаимодействия. Однако тенденции изменения этих коэффициентов неоднозначны, что требует дополнительного анализа.

Сравнение экспериментальных и расчетных кривых скорости пластин на начальной стадии разгона (рис.8) показывает, что максимальная невязка на всей совокупности экспериментальных данных по V_{i+1} не превышает 15%.

Выводы

1. Определены количественные зависимости настроечных коэффициентов кинематической модели сварки металлических пластин при их высокоскоростном соударении от условий проведения процесса. Проведены оценки и построены кривые разгона взаимодействующих в полете металлических пластин при сварке взрывом.

2. Предложены удобные для расчета аппроксимирующие функции настроечных параметров, дающие удовлетворительное согласие с экспериментальными данными по сварке взрывом многослойных композиций сталь-сталь и алюминий-алюминий.

Литература

1. Лысак В.И., Кузьмин С.В. Сварка взрывом. М.: Машиностроение-1, 2005, 544 с.
2. Соннов А.П., Трыков Ю.П. К расчету параметров сварки взрывом многослойных соединений. ФХОМ, 1973, №4, с.128-133.
3. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов. Ред. М.А.Мейерс, Л.Е.Мурр. М.: Металлургия, 1984, 512 с.
4. Беляев В.И., Ковалевский В.Н., Смирнов Г.В., Чекан В.А. Высокоскоростная деформация металлов. Минск: Наука и техника, 1976, 224 с.
5. Кузьмин С.В., Лысак В.И., Стариков Д.В. Кинетика соударения металлических пластин в многослойном пакете при сварке взрывом. Прикладная механика и техническая физика, 1994, №5, с.173-175.
6. Багмутов В.П., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Модель разгона металлических пластин при сварке взрывом многослойных пакетов. ФХОМ, 2005, №6, с.47-51.
7. Кузьмин Г.Е., Пай В.В., Яковлев И.В. Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2002, 312 с.
8. Кузьмин С.В., Багмутов В.П., Лысак В.И., Арестов Е.С. Расчетно-экспериментальное определение длительности начальной стадии разгона металлических пластин при сварке взрывом многослойных пакетов. ФХОМ, 2009, №5, с.59-64.
9. Калиткин Н.Н. Численные методы. М.: Наука, 1978, 512 с.