



КИНЕТИКА РАЗГОНА ЭЛЕМЕНТОВ МНОГОСЛОЙНЫХ ПАКЕТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН ПРИ СВАРКЕ ВЗРЫВОМ

С. В. КУЗЬМИН, канд. техн. наук (Волгоград. гос. техн. ун-т, РФ)

Рассмотрены основные закономерности кинетики разгона пластин многослойного пакета при сварке взрывом. На примере трехслойного пакета оценено влияние исходных условий сварки на характер изменения скорости соударения на второй межслойной границе.

Ключевые слова: сварка взрывом, высокоскоростное соударение, многослойный пакет, слоистый композит, условия сварки, кинетика разгона

Достоверная оценка значений параметров, характеризующих кинетику процесса соударения слоев многослойных композитов при сварке взрывом (в первую очередь послеслойных скоростей соударения), является чрезвычайно важной задачей при технологическом проектировании, решение которой осложнено как отсутствием сколько-нибудь физически обоснованного расчетного аппарата, так и незначительным количеством экспериментальных данных. Существующие математические модели [1–7] описывают процесс соударения элементов многослойных пакетов пластин при сварке взрывом в довольно грубом приближении. Вследствие допущений, содержащихся в них, из рассмотрения исключена начальная стадия разгона элементов [6–8] на второй и последующих границах свариваемого пакета, что приводит к существенным ошибкам при оценке межслойных скоростей соударения и, как следствие, сложности в реализации оптимальных свойств многослойных композитов. Уточнение же существующих моделей возможно лишь на основе детального экспериментального исследования закономерностей разгона и соударения элементов многослойных пакетов пластин при сварке взрывом.

Цель и методика исследования. Целью настоящей работы явилось исследование влияния условий сварки взрывом (толщины или массы соударяющихся элементов, скорости детонации взрывчатого вещества и фазы разгона метаемой пластины) на характер и кинетику разгона элементов трехслойных пакетов на второй межслойной границе свариваемой композиции с использованием методики, предложенной в работе [9].

Для достижения поставленной цели провели серию однофакторных опытов (таблица), в рамках которых варьировали толщину свариваемых алюминиевых пластин δ_i , скорость детонации D взрывчатого вещества (ВВ) и фазу разгона метаемого элемента, характеризующуюся отношением h_1/H (h_1 — зазор на первой границе пакета; H — высота заряда ВВ) и количественно определяющую относительное значение остаточного давления p/p_0 ,

(где p — остаточное давление продуктов детонации (ПД) на поверхности метаемой пластины в выбранный момент времени τ ; p_0 — давление, действующее на поверхность метаемой пластины во фронте детонационной волны [10]):

$$p = \frac{64}{27} p_0 \left(\frac{H}{D\tau} \right)^3, \quad (1)$$

$$p_0 = \frac{1}{4} \rho_0 D^2, \quad (2)$$

где ρ_0 — исходная плотность используемого ВВ.

Степень влияния того или иного параметра оценивали сопоставлением длительностей начальных стадий разгона τ_n пакета из двух сваренных пластин при различных значениях одного из варьируемых в заданном диапазоне параметров и сохранении остальных без изменения в каждой серии опытов (таблица). При этом во всех случаях строили расчетные [10] и экспериментальные кривые разгона для каждой границы соударения, а также графические зависимости, характеризующие динамику изменения скорости движения тыльной поверхности сваренного пакета из двух пластин $v_{c_2} = f(\tau)$ на начальной стадии разгона.

Под длительностью начальной стадии разгона τ_n полагали время разгона тыльной поверхности

Параметры сварки в серии однофакторных опытов

№ серии опытов	Толщина слоев δ_i , мм	Скорость детонации D , м/с	h_1/H
1	1,9+1,9+3,8	3420	0,017
	3,8+3,8+7,6	3420	0,017
2	3,8+3,8+7,6	3420	0,017
	3,8+3,8+7,6	3420	1,000
3	3,8+3,8+7,6	3600	0,014
	3,8+3,8+7,6	3600	1,000
4	3,8+3,8+7,6	2500	0,014
	3,8+3,8+7,6	2500	1,000
5	3,8+3,8+7,6	3600	1,000
	3,8+3,8+7,6	2500	1,000
6	3,8+3,8+7,6	3600	0,014
	3,8+3,8+7,6	2500	0,014



сваренного в полете пакета из двух пластин до скорости полета v_{II} , рассчитанной из закона сохранения количества движения для изолированной системы [11]. Определение данного параметра производилось следующим образом:

1) экспериментальные кривые разгона пакета аппроксимировали эмпирическими зависимостями экспоненциального вида, связывающими $v_{c_2}(y)$ с расстоянием, пройденным тыльной поверхностью этого пакета y :

$$v_{c_2}(y) = A(1 - e^{-by}), \quad (3)$$

где A и b — экспериментальные коэффициенты;

2) из закона сохранения количества движения для изолированной системы рассчитывали скорость полета пакета из двух сваренных пластин после их соударения:

$$v_{II} = \frac{m_1}{m_1 + m_2} v_{c_1}, \quad (4)$$

где m_1 и m_2 — соответственно единичные массы метаемой (первой) и промежуточной (второй) пластин в свариваемом трехслойном пакете; v_{c_1} — скорость соударения на первой межслойной границе;

3) с использованием полученных ранее эмпирических зависимостей или графическим путем определяли расстояние $y = h_{II}$ (h_{II} — расстояние от нижней поверхности пакета из двух пластин, на котором он приобретает скорость v_{II} , рассчитанную из закона сохранения количества движения);

4) рассчитывали искомую τ_{II} :

$$\tau_{II} = \int_0^{y=h_{II}} \frac{dy}{v_{c_2}(y)}. \quad (5)$$

Рассмотрим более подробно влияние указанных выше параметров на характер разгона многослойных пакетов пластин и длительность его начальной стадии τ_{II} .

Влияние массы свариваемых элементов. Проведенные исследования показали, что масса (толщина) свариваемых пластин оказывает значительное влияние на длительность начальной стадии разгона, рост которой происходит при соответствующем увеличении массы пластин.

Так, при сварке пакета алюминиевых пластин с соотношением толщины слоев (1,9 + 1,9 + 3,8) мм ($D = 3420$ м/с, $h_1/H = 0,017$) (серия опытов № 1) длительность начальной стадии разгона τ_{II} пакетов пластин составила приблизительно 1,6 мкс. Увеличение толщины свариваемых элементов вдвое (3,8 + 3,8 + 7,6 мм) при прочих равных условиях привело к пропорциональному росту τ_{II} приблизительно до 2,7 мкс (рис. 1). При этом более массивный пакет разгоняется менее интенсивно, что, очевидно, связано с различной инерционностью свариваемых элементов.

Влияние фазы разгона. Изменение фазы разгона метаемого элемента, которая, как уже ука-

зывалось, количественно определяет относительное значение остаточного давления продуктов детонации на поверхности свариваемого пакета p/p_0 , также оказывает существенное влияние как на длительность начальной стадии разгона пакета пластин, так и на характер изменения v_{c_2} (рис. 2).

При этом рост отношения h_1/H с 0,017 до 1,000 (серия опытов № 2) вызывает увеличение длительности начальной стадии разгона приблизительно от 2,7 до 6,5 мкс.

Аналогичные результаты получены и при других условиях сварки — в сериях опытов № 3 ($D = 3600$ м/с) и № 4 ($D = 2500$ м/с), в которых продолжительность начальной стадии изменяли соответственно от 1,8 до 4,6 и от 4 до 8,7 мкс при h_1/H , равном 0,014 и 1,000.

Такое изменение «инерционности» процесса разгона можно связать с соответствующим влиянием уменьшения остаточного внешнего давления p на систему взаимодействующих элементов, показанным на рис. 3, где точка A соответствует остаточному давлению, действующему на поверхность верхней (метаемой) пластины в момент со-

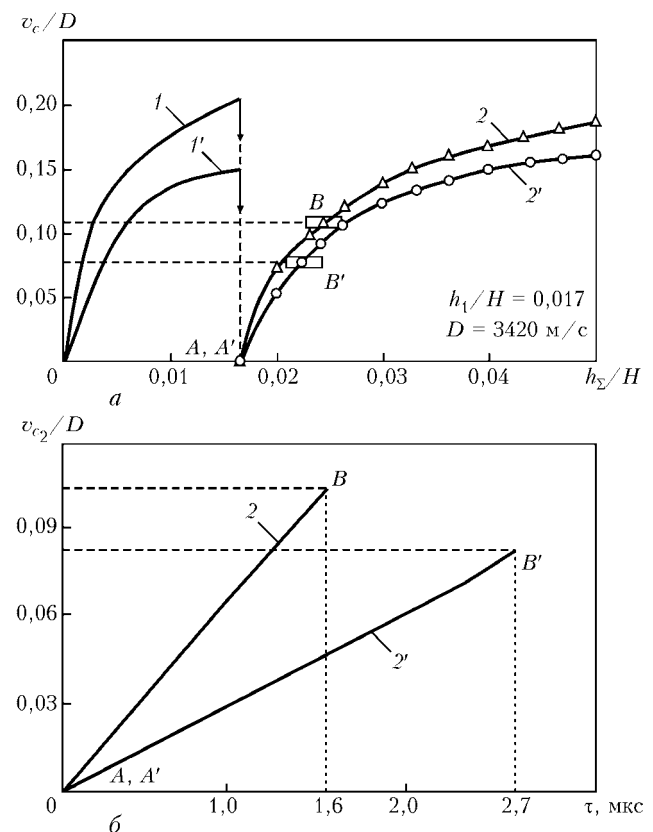


Рис. 1. Кривые разгона элементов в трехслойном пакете алюминиевых пластин (а) и характер изменения v_{c_2} на начальной стадии разгона (б) при различной толщине свариваемых пластин (серия опытов № 1): 1, 1' — расчетные кривые [7] (разгон метаемой пластины); 2, 2' — экспериментальные (разгон сваренного в полете двухслойного пакета); 1, 2 — $\delta_1 + \delta_2 = (1,9 + 1,9)$ мм; 1', 2' — $\delta_1 + \delta_2 = (3,8 + 3,8)$ мм; точки A и A' — начало движения двухслойного пакета из состояния покоя (для двух условий опыта, соответствующих кривым 1, 1' и 2, 2'); B и B' — момент достижения двухслойного пакета скорости, рассчитанной из закона сохранения количества движения; \square — скорость пакета, рассчитанная из закона сохранения количества движения (4)

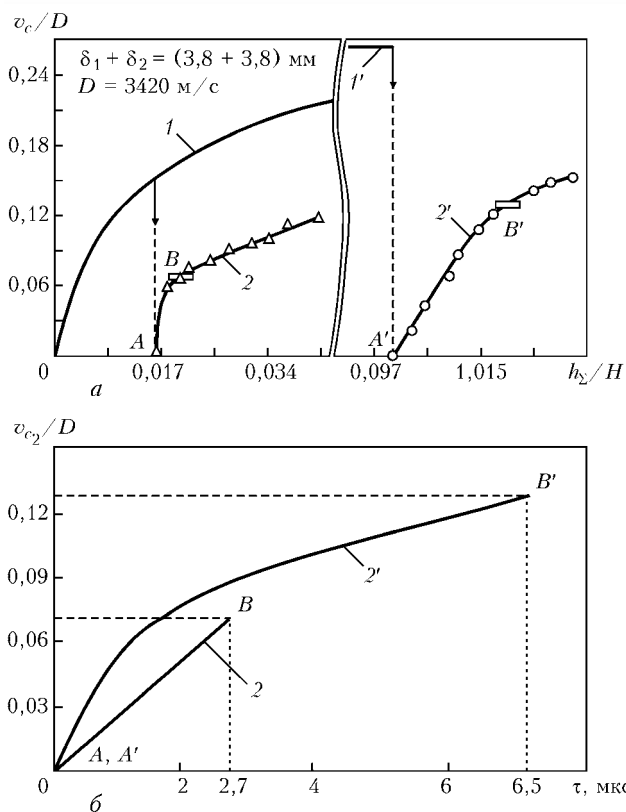


Рис. 2. Кривые разгона элементов в трехслойном пакете алюминиевых пластин (а) и характер изменения v_{c2} на начальной стадии (б) при различных фазах разгона метаемой пластины (серия опытов № 2): 1, 2 – $h_1/H = 0,017$; 1', 2' – $h_1/H = 1,000$; остальные обозначения см. рис. 1

ударения пластин при $h_1/H = 0,017$ ($p \approx 2,8$ ГПа), а точка А' – при $h_1/H = 1,000$ ($p \approx 8,0$ ГПа).

Влияние скорости детонации. Скорость детонации D также оказывает значительное влияние на длительность начальной стадии разгона, при этом более интенсивный разгон пакета наблюдается при больших значениях D , что приводит к снижению τ_n . Так, увеличение значений D от 2500 до 3600 м/с при реализации полного разгона метаемой пластины (серия опытов № 5) вызывает

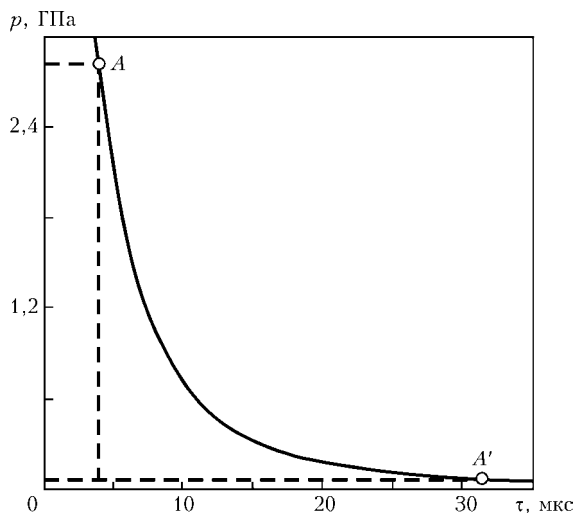


Рис. 3. Изменение давления p на поверхности метаемой пластины по формуле (1) (серия опытов № 2): А – соударение первой и второй пластины при $h_1/H = 0,017$; А' – при $h_1/H = 1,000$

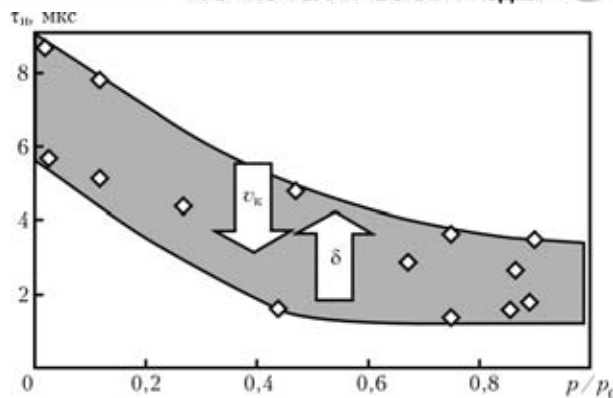


Рис. 4. Зависимость длительности начальной стадии разгона пакета τ_n соударившихся пластин на второй межслойной границе от относительного давления p/p_0 ПД (v_k – скорость контакта)

уменьшение τ_n с 8,7 до 4,6 мкс. Такое же изменение скорости детонации в условиях действия на метаемую пластину значительных остаточных давлений ($h_1/H = 0,014$, серия опытов № 6) закономерно приводит к соответственному уменьшению τ_n приблизительно от 4,0 до 1,8 мкс.

Таким образом, основными факторами, оказывающими влияние на длительность и характер разгона на начальной стадии, являются масса (толщина) свариваемых элементов и остаточное давление ПД на поверхности метаемой пластины. В обобщенном виде экспериментальные результаты можно изобразить в виде зависимости длительности начальной стадии разгона пакета пластин τ_n от давления ПД на поверхности свариваемой системы p/p_0 (рис. 4), представляющей собой некоторую область, верхняя граница которой соответствует большей массе свариваемых при сварке взрывом элементов и низким скоростям точки контакта, а нижняя – меньшей массе (толщине) элементов пакета и высоким скоростям точки контакта. Левая часть области относится к случаю полного разгона метаемой пластины продуктами детонации ВВ при сварке взрывом, а правая – к неполному разгону ($p/p_0 \gg 0$).

Выводы

1. Экспериментально установлено, что при сварке взрывом многослойных слоистых композиционных материалов разгон пакета соударившихся пластин на второй и последующих границах происходит не мгновенно, а через некоторый промежуток времени τ_n , длительность которого может составлять в зависимости от параметров процесса 10 мкс. Существенное влияние на τ_n , а также на кинетику разгона оказывают масса (толщина) пластин, скорость точки контакта и фаза разгона метаемой пластины.

2. Показано, что возрастание толщины (или массы) соударяющихся элементов, а также скорости детонации и остаточного давления продуктов детонации приводит к существенному увеличению длительности разгона пакета соударившихся пластин на начальной стадии. Это обстоятельство необходимо учитывать при назначении технологических параметров сварки взрывом многослойных металлических композитов.



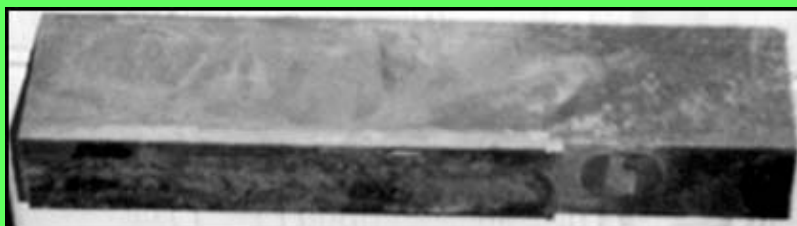
1. *Высокоскоростная деформация металлов* / В. И. Беляев, В. Н. Ковалевский, Г. В. Смирнов, В. А. Чекан. — Минск: Наука и техника, 1976. — 224 с.
2. Соннов А. П., Трыков Ю. П. К расчету параметров сварки взрывом многослойных соединений // Физика и химия обраб. материалов. — 1973. — № 4. — С. 128–133.
3. *Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов* / Под ред. М. А. Мейерса, Л. Е. Мурра. — М.: Металлургия, 1984. — 512 с.
4. Zhang Dengxia. Research on movement of layer plate in explosive welding // Trans. China Welding. Inst. — 1983. — 4, № 3. — P. 109–118.
5. Shao P. H., Zhou Z. H., Li G. H. Calculation on explosive bonding parameters of multi-layer plates under glancing detonation // 6 Intern. symp. of use energy of explosive, Pradubise, CSSR, Sept. 22–24, 1985. — Praha, 1985. — P. 57–63.
6. *Оценка параметров соударения при сварке взрывом многослойных композиций* / В. Г. Шморгул, А. П. Соннов, Ю. П. Трыков, И. А. Ковалев // *Металловедение и прочность материалов: Межвуз. сб. науч. тр.* — Волгоград: ВолгГТУ, 1997. — С. 20–25.
7. *Компьютерная модель расчета и оптимизации технологических параметров сварки взрывом* / В. И. Лысак, В. А. Сапарин, С. В. Кузьмин, Д. В. Стариков // *Новые промышленные техника и технологии. Компьютерное обеспечение и компьютерные технологии: Тез. докл. I Межвузов. науч.-практ. конф., г. Волгоград, 5–9 дек. 1994.* — Волгоград, 1994. — С. 113.
8. Кузьмин С. В., Лысак В. И., Стариков Д. В. Кинетика соударения металлических пластин в многослойном пакете при сварке взрывом // *Приклад. механика и техн. физика.* — 1994. — № 5. — С. 173–175.
9. Кузьмин С. В., Лысак В. И., Саломатин И. А. Методика оценки параметров разгона пластин в многослойном пакете при сварке взрывом // *Автомат. сварка.* — 2001. — № 2. — С. 20–24.
10. *Физика взрыва* / Под ред. К. П. Станокевича. — М.: Наука, 1975. — 704 с.
11. *Александров Е. В., Соколинский В. Б. Прикладная теория и расчеты ударных систем.* — М.: Наука, 1969. — 199 с.

Main principles of the kinetics of acceleration of a multilayer stack plates in explosion welding are considered. The effect of initial welding conditions on the character of variations in the collision velocity at the second interlayer boundary has been evaluated by an example of a three-layer stack.

Поступила в редакцию 06.09.2004

ТЕХНОЛОГИЯ НАПЛАВКИ ТРЕНИЕМ С ПЕРЕМЕШИВАНИЕМ МЕДИ И ЕЕ СПЛАВОВ

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология наплавки меди и ее сплавов трением с перемешиванием. Суть процесса заключается в следующем. Наплавляемая деталь и присадочный материал в виде пластины закрепляют с помощью прижимов. Вращающийся рабочий инструмент вводится в соприкосновение с присадочной пластиной до упора. От трения инструмента генерируется тепло, необходимое для увеличения пластичности присадочного материала и части металла детали. При перемещении инструмента образуется нахлесточный шов. Детали наплавляются последовательным наложением таких швов с перекрытием.



Опытная установка на базе вертикально-фрезерного станка с мощностью привода 10 кВт позволяет наплавить слой меди толщиной до 1 мм.

Разработаны конструкции рабочих инструментов с разным соотношением геометрических размеров и форм составных частей, которые имеют достаточный запас работоспособности на длительное время в условиях высоких механических и тепловых нагрузок.

Оборудование отличается простотой конструкции и обслуживания. Площадь для размещения основного оборудования — 50 м².

Определен диапазон основных параметров — скорости наплавки и частоты вращения инструмента, обеспечивающие качественное формирование наплавленного пласта.

Области применения. Ремонт и восстановление размеров металлургического, электротехнического оборудования, транспортных средств.

Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины
03680, Украина, Киев-150, ул. Боженко, 11, отд. № 6
Тел.: (38044) 287 47 02, тел./факс: (38044) 528 04 86
E-mail: office@paton.kiev.ua