УДК 539.374

Н.П.Михайлов

НАГРУЖЕНИЕ КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕД СХОДЯЩИМИСЯ КОСЫМИ ВОЛНАМИ

Керченский морской технологический институт, 334509, г. Керчь, ул. С. Орджоникидзе, 82

Статья поступила 7 октября 1993 года

Описана конструкция генератора ударных волн, позволяющая реализовать широкий спектр режимов косых соударений плоских ударников. Приведен расчет кинематических параметров соударений в зависимости от величины заряда и геометрии ударника.

Косые соударения плоских ударников, широко применяются в технологических процессах сварки взрывом [1] и резке металлов кумулятивными зарядами [2,3]. При сварке взрывом кинематические параметры соударений рассматривались преимущественно для схем метания пластин, в которых фронт детонации заряда в любой момент времени остается параллельным плакируемой поверхности [4]. Более сложные схемы соударений используются для резки металлов удлиненными кумулятивными зарядами, где основными параметрами, определяющими эффективность резки, являются скорость и угол схлопывания кумулятивной облицовки [5].

Совершенствование методов обработки металлов взрывом сопровождается усложнением конструкции зарядов и схем нагружения, что вызывает небходимость проведения систематических исследований кинематических параметров соударений плоских ударников.

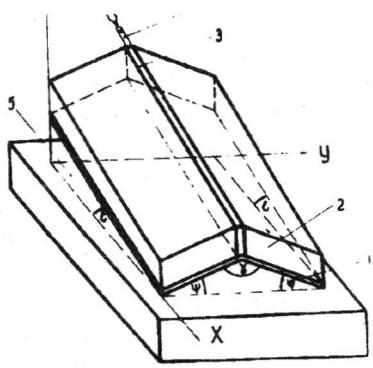

Рис. 1. Генератор ударных волн: *1* — ударник, *2* — заряд, *3* — линейный инициатор, *4* — детонатор, *5* — поверхность соударения

На рис. 1 представлена конструкция генератора ударных волн, предложенного в работе [6]. Условия плоского соударения определяются зависимостями.

$$\Psi = \mathrm{arctg}\,(\cos\varphi \cdot tg\beta)\,, \qquad (1)$$

$$\varepsilon = \arcsin\,(\sin\varphi \cdot \sin\beta)\,, \qquad (2)$$

где Ψ и ε — углы установки ударников, φ — угол между детонационным фронтом заряда и линейным инициатором, β — угол поворота ударника под детонационным фронтом. Величины φ и β определяются по известным зависимостям [1,7]. Если углы установки ударников Ψ' и ε' не удовлетворяют соотношениям (1) и (2),т.е. $\Psi' \neq \Psi$ и $\varepsilon \neq \varepsilon$, то устройство, представленное на рис. 1, можно

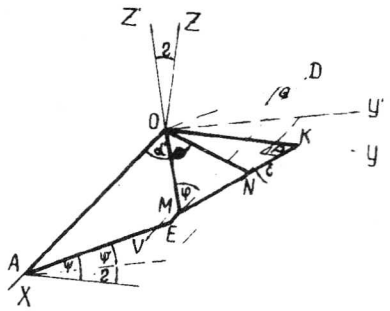

Рис. 2. Схема расчета косых соударений

использовать как генератор косых ударных волн, который позволяет реализовать широкий спектр режимов соударений.

Практический интерес для сварки и кумулятивной резки металлов представляет схема, при которой края ударников генератора косых волн (ГКВ) устанавливаются параллельно нагружаемой поверхности. Найдем основные параметры соударения для этой схемы, к которым относятся: положение линии взаимодействия ударников с нагружаемой поверхностью (линии контакта), скорость линии контакта, углы соударения ударников между собой и с поверхностью нагружения.

Обозначим угол между ударниками ГКВ через γ, где $\gamma = 180° - 2\Psi'$ при условии $\Psi' \neq \Psi$. На рис.2 в лабораторной системе координат, связанной с детонационным фронтом (точка M) линейного инициатора ED, показана схема деформации ударника $AODE$ генератора косой волны после взрыва. Для упрощения расчетов на схеме выбран момент времени, когда фронт детонации заряда, расположенного на ударнике, происходит через начало координат. Анализ зависимостей (1) и (2), приведенный в [6], показал, что при условиях $\Psi' = \Psi$, $\varepsilon' = 0$ участок ударника OMD после взрыва повернется вокруг линии детонационного фронта OM на угол β и займет положение плоскости OMK, которая образует с поверхностью нагружения угол ε, удовлетворяющий выражению (2). При этом плоскость OMK пересечет плоскость нагружения по оси $0y$. Т.е. линия контакта будет перпендикулярна вектору скорости детонации линейного инициатора DE. Приведенная на рис. 2 конфигурация является квазистационарной, что позволяет рассчитать параметры взаимодействия ударников ГКВ с поверхностью нагружения. На рис. 3 приведены схемы деформации ударников и их взаимодействия с поверхностью нагружения для трех характерных случаев, имеющих практическое значение. На схемах положение линии контакта определяется углом φ', который она образует с осью $0x$ или с плоскостью симметрии генератора.

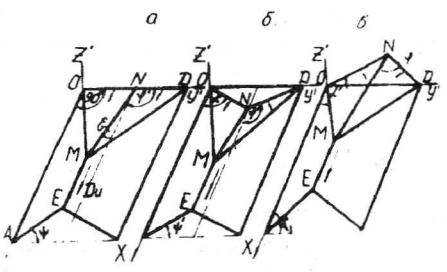

Рис. 3. Схемы взаимодействия полок генератора с поверхностью нагружения: *а — образование косой волны, б —* образование двух расходящихся косых волн, *в* — образование двух сходящихся косых волн

Схема, приведенная на рис. 3, *а*, соответствует условию $\Psi' \neq \Psi$, $\varepsilon' = 0$. Как видно из рис. 3, *а*, взаимодействие ударников с поверхностью нагружения (пл. $0xy$) аналогично параллельной схеме сварки с прямолинейным фронтом детонации заряда. При этом скорость линии контакта для генератора косой волны будет равна скорости детонации линейного инициатора, а не заряда, как это имеет место при сварке взрывом.

На рис. 3,*б* приведена схема, соответствующая условию $\Psi' < \Psi$., $\varepsilon' = 0$, при котором $\varphi' > 90°$, а линия кон-

такта становится ломаной, что приводит к образованию двух ударных волн, перемещающихся в направлении от оси симметрии генератора (расходящихся волн). При условии $\Psi' > \Psi$, $\varepsilon' = 0$ (см. рис. 3,в) угол $\varphi' < 90°$, при котором образуются две сходящиеся ударные волны, которые взаимодействуют в плоскости симметрии генератора. Таким образом, величина угла φ' имеет принципиальное значение, поскольку определяет характер нагружения обрабатываемой поверхности. Найдем угол φ'.

Из рис. 3 находим $\varphi' = 90° - \alpha$, где α' — угол между линией контакта и осью $0x$, отсчитываемый против часовой стрелки. Для расчета угла α' воспользуемся схемой, приведенной на рис. 2, где в лабораторной системе координат плоскостью $AODE$ обозначено исходное положение ударника генератора, а прямой OM - положение фронта детонации заряда при условии $\Psi' = \Psi$, $\varepsilon' = 0$.

Вначале рассмотрим случай, когда $\Psi' < \Psi$, т.е. волны расходятся. Обозначим разность $\Psi - \Psi' = \eta$, тогда если отсчет η производить от положительного направления оси 0у против часовой стрелки будем иметь $\Psi' = \Psi - \eta$.

Для расчета α' повернем координатную плоскость $0xy$ (плоскость нагружения) вокруг оси $0x$ против часовой стрелки на угол η. Тогда угол между исходным положением ударника $AODE$ и новым положением координатной плоскости $0xy'$ (плоскости нагружения) будет равен Ψ', при этом деформированная после взрыва часть ударника OMK пересечет плоскость нагружения по прямой ON (линия контакта), которая образует с осью $0x$ искомый угол α'.

Для определения α' найдем уравнение прямой ON в системе координат $0xy'z'$. Прямая $0N$ является следом пересечения плоскостей P (пл. OMK) и $0xy'$. Уравнение пл. P в старой системе координат $0xy'z'$ записывается в виде

$$x \cdot \sin\varepsilon + z \cdot \cos\varepsilon = 0. \tag{3}$$

Для нахождения уравнения пл. P в новой системе $0xy'z'$ используем преобразования координат при повороте осей $0y$ и $0z$ на угол η. Известные зависимости дают взаимосвязь между старыми x, y, z и новыми x',y',z' координатами в виде

$$\begin{aligned} x &= x', \\ y &= y' \cdot \cos\eta - z' \cdot \sin\eta, \\ z &= y' \cdot \sin\eta + z' \cdot \cos\eta. \end{aligned} \tag{4}$$

После подстановки (4) в (3) находим уравнение пл. P в новой системе координат

$$x' \cdot \sin\varepsilon - y' \cdot \sin\eta \cdot \cos\varepsilon + z' \cdot \cos\eta \cdot \cos\varepsilon = 0 \tag{5}$$

Тогда уравнение прямой ON запишется в виде системы уравнений

$$\begin{cases} x' \cdot \sin\varepsilon - y' \cdot \sin\eta + z' \cdot \cos\eta \cdot \cos\varepsilon = 0, \\ z' = 0. \end{cases} \tag{6}$$

Решая систему (6), находим уравнение прямой ON

$$x' \cdot \sin\varepsilon - y' \cdot \sin\eta \cdot \cos\varepsilon = 0$$

или

$$y' = \frac{tg\,\varepsilon}{\sin\eta} \cdot x', \tag{7}$$

где отношение $\frac{tg\,\varepsilon}{\sin\eta}$ есть угловой коэффициент прямой $0N$, проходящей через начало координат, т.е.

$$tg\,\alpha' = \frac{tg\,\varepsilon}{\sin\eta}. \tag{8}$$

Поскольку $\alpha' = 180° - \varphi'$, из (8) находим

$$tg\,\varphi' = \frac{tg\,\varepsilon}{\sin(\Psi' - \Psi)}. \tag{9}$$

Из выражения (9) следует, что если $\eta = \Psi - \Psi' > 0$ то угол φ' изменяется в пределах $90° < \varphi' < 180°$, при этом образующиеся в результате соударения косые волны расходятся (см. рис. 3,*б*). Если $\eta < 0$, то $0 < \varphi' < 90°$ и волны сходятся. Из приведенного выше анализа параметров соударения следует, что при $\eta < 0$ устройство, приведенное на рис. 3,*в*, может использоваться как генератор косых сходящихся волн.

После подстановки (1) в (9) и преобразований окончательно получаем выражение для расчета угла встречи волн на нагружаемой поверхности

$$tg\,\varphi' = \frac{\sin\varphi}{ctg\,\beta\cdot\sin\Psi' - \cos\varphi\cdot\cos\Psi'}. \tag{10}$$

Рассматриваемая схема косых соударений может быть использована для сварки взрывом. При этом для выбора режимов сварки возникает необходимость определения угла ζ соударения пластины с плакируемой поверхностью, а также скорости перемещения линии контакта. В лабораторной системе координат, приведенной на рис 2, угол соударения ζ равен линейному углу между плоскостями P и $0xy$, который определяется из выражения

$$\cos\zeta = \frac{A\,A_1 + B\,B_1 + C\,C_1}{\pm\sqrt{(A^2 + B^2 + C^2)\cdot(A_1^2 + B_1^2 + C_1^2)}}, \tag{11}$$

где A, B, C и A_1, B_1, C_1 — коэффициенты нормальных векторов в общих уравнениях плоскостей. Подставляя соответствующие значения коэффициентов из (6) в (1), после преобразований находим

$$\cos\zeta = \cos\varepsilon\cdot\cos\eta. \tag{12}$$

Выражение (12) всегда определяет значение двух углов между плоскостями P и $0xy'$, поэтому знак правой части принимают, исходя из конкретных условий задачи. Подставляя $\eta = \Psi - \Psi'$, (1) и (2) в (12), после преобразований получим

$$\cos\zeta = \sqrt{\cos^2\varphi + \cos^2\beta\cdot\sin^2\varphi}\,(\cos\Psi\cdot\cos\Psi' + \sin\Psi\cdot\sin\Psi'), \tag{13}$$

где

$$\sqrt{\cos^2\varphi + \cos^2\beta\cdot\sin^2\varphi} = \cos\varepsilon. \tag{14}$$

Выражая в (13) функции $\cos\Psi$ и $\sin\Psi$ через функции углов β и φ, из (1) окончательно получаем

$$\cos\zeta = \cos\beta\cdot\cos\Psi' + \sin\beta\cdot\cos\varphi\cdot\sin\Psi'. \tag{15}$$

Из полученных зависимостей (13) и (14) следует, что при $\Psi = \Psi'$ и $\cos\zeta = \cos\varepsilon$ и $\zeta = \varepsilon$, что удовлетворяет выражению (1). При $\Psi' = 0$ из (15)

получаем очевидное равенство $\zeta = \beta$, поскольку в этом случае фронт детонации заряда располагается на нагружаемой поверхности (см. рис. 2).

Из геометрических построений, представленных на схеме рис. 2, следует, что линия контакта *0N* в процессе взрыва перемещается параллельно самой себе в направлении оси $0x$ со скоростью детонации линейного инициатора. Тогда нормальная скорость перемещения прямой *0N* определяется равенством

$$V_k = V \cdot \sin \alpha', \tag{16}$$

где V - скорость детонации линейного инициатора.

Учитывая, что $\alpha' = 180° - \varphi'$, имеем

$$V_k = V \cdot \sin \varphi'. \tag{17}$$

После подстановки значения φ' из (10) в (17) получаем выражение для расчета скорости линии контакта

$$V_k = V \cdot \sin \operatorname{arctg} \frac{\sin \varphi}{\operatorname{ctg} \beta \cdot \sin \Psi' - \cos \varphi \cdot \cos \Psi'}. \tag{18}$$

Из анализа (18) следует, что в области существования сходящихся волн ($\Psi < \Psi'$) скорость линии контакта меньше скорости детонации линейного инициатора, что ограничивает возможности его практического использования. Максимальная величина $V_k = V$ достигается, если $\Psi' = \Psi$, при этом $\varphi' = 90°$.

Для кумулятивной резки металлов практическое значение имеет генератор косых сходящихся волн, удовлетворяющий условию $\Psi' > \Psi$, $\varepsilon' = 0$. В этом случае угол между полками генератора 2υ после взрыва становится меньше 180°. Найдем этот угол.

Из схемы, приведенной на рис. 3,*в*, следует, что плоскость симметрии генератора делит угол между деформированными ударниками пополам. Поскольку плоскость симметрии компланарна координатной плоскости $0xz'$, задача сводится к вычислению угла υ между плоскостью ударника *0NM* и координатной плоскостью $0xz'$.

Подставляя соответствующие коэффициенты из этих уравнений плоскостей, в (11) находим

$$\cos \upsilon = \pm \sin (\Psi - \Psi') \cdot \cos \varepsilon. \tag{19}$$

Примимая знак "минус" и выражая $\cos \varepsilon$ через функции углов φ и β, после преобразований находим

$$\cos \upsilon = \cos \beta \cdot \sin \Psi' - \sin \beta \cdot \cos \varphi \cdot \cos \varphi'. \tag{20}$$

Для экспериментальной проверки результатов расчета использовались пластины из стали ст.3 размером 250 x 120 x1,5 мм и отоженной меди с плотностью $\rho_м = 8{,}9$ г/см^3 размером 250x120x2 мм. Для метания пластин применялся плоский заряд из аммонита 6ЖВ плотностью $\rho_в = 9{,}5$ г/см^3 с высотой $H = 30$ мм. В качестве линейного инициатора использовался удлиненный заряд сейсмопласта сечением 30x10 мм, который располагался по краю пластины с $l = 250$ мм. Размеры заряда и линейного инициатора сохранялись постоянными во всех экспериментах.

Исходные значения углов разворота детонационного фронта φ и углов по-

ворота ударников под детонационным фронтом β определялись экспериментально электроконтактным методом по методике, предложенной в работах [8,9]. При определении угла φ электрические контакты располагались в плоскости, параллельной ударнику, а при измерении угла β — в плоскости, перпендикулярной детонационному фронту и ударнику. В последнем случае индуцирование заряда производилось детонатором в центре края ударника с $l = 120$ мм (линейный инициатор не использовался). Для измерения интервалов времени замыкания контактов использовались частотомеры ЧЗ-33. Величины углов вычислялись по формуле

$$tg\,\varphi = \frac{(1+k)\,h}{k \cdot b + a},$$

где $k - \dfrac{\tau_1}{\tau_1 + \tau_2}$;

a, b, и h — параметры взаимного расположения контактов, τ_1 и τ_2 — интервалы времени замыкания контактов.

Результаты измерений приведены в табл. I.

Таблица I. Результаты измерений углов φ и β

Характеристика пластины		К-во опытов	β°			φ°		
материал	δ, *мм*		max	min	средн.	max	min	средн.
ст. 3	1,5	6	20,5	21,9	21,2	27,6	29,2	28,5
медь	2,0	5	16,9	18,1	17,5	—	—	—

Экспериментальные измерения угла соударения ζ и угла разворота линии контакта φ' выполнялись для схемы генератора косых волн, приведенной на рисунке 3,*в*. Измерения выполнялись по описанной выше методике. В каждой серии опытов угол соударения измерялся после измерения угла φ'. При этом электрические контакты располагались по прямой, перпендикулярной линии контакта.

Расчет величин φ' и ζ выполнялся по формулам (10) и (15) соответственно. Необходимые для расчета значения φ и β брались из табл. 1. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты экспериментов по измерению параметров соударения генератора косых волн

Условия эксперимента					К-во опытов	φ°			ζ°		
Материал пластины	δ, *мм*	φ°	β°	Ψ°		опыт	расчет	$\Delta\varphi^\circ$, %	опыт	расчет	$\Delta\zeta^\circ$, %
ст. 3	1,5	28,5	21,2	30	4	40,1	42,1	-4,9	14,8	14,9	-0,07
	1,5	28,5	21,2	45	5	20,2	21,6	-6,9	22,6	23,5	-3,9
медь	2,0	28,5	17,5	30	6	32,5	30,0	+7,7	16,5	16,6	-0,08
	2,0	28,5	17,5	45	5	17,3	16,4	+5,2	28,1	27,5	+2,1

Как видно из табл. 2, различие в экспериментальных и расчетных значениях углов соударения не превышает 8%, что не выходит за пределы разброса результатов измерения углов φ и β.

N.P.Mikhailov

THE LOADING OF CONDENSED MEDIA BY CONVERGING OBLIQUE WAVES

A design of shock-wave generator has been described making it possible to realize a wide spectrum of modes of the flat shock-wave oblique collisions. A calculation of kinematic parameters of collisions depenent on charge size and geometry of shock wave is given.

Fig.1. Shock-wave generator: *1* — shock wave; *2* — charge; *3* — linear initiator; *4* — detonator; *5* — collision surface
Fig.2. Scheme for calculation of oblique collisions
Fig.3.Scheme for interaction of generator shelves with the surface of loading: *а* — formation of oblique wave; *б* — formation of two diverging oblique waves; *в* — formation of two converging oblique waves

1. *А.А.Дерибас.* Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, 1972, с.92.
2. *Вспомогательные системы ракетно-космической техники. Сб. переводов. Под ред. И.В.Тушина, М. - Мир. 1970.*
3. *В.Опилатов.* Зарубежное военное обозрение 9, 29 (1974).
4. *Ю.А.Конон, Л.Б.Первухин, А.Д.Чудковский.* Сварка взрывом. - М.: Машиностроение, 1987.
5. *Б.И.Шехтер, Л.А.Шушко, С.Л.Крыськов,* ФГВ 2, 244 (1977).
6. *Н.П.Михайлов.* Нагружение твердых сред плоскими ударными волнами. Деп. в УкрНИИНТИ 13. 07.89 г. №1801-89.
7. *Физика* быстропротекающих процессов. - М.: Мир, 1971, т.2, с.291.
8. *А.А.Аксенов, В.Д.Рагозин, П.О.Пашков,* Применение энергии взрыва в сварочной технике. - Киев, ИЭС им. Патона, 1977, с.49.
9. *Ю.В.Гаек и др.* Применение энергии взрыва в сварочной технике. - Киев, ИЭС им. Патона, 1977, с.51.