

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. А. Феоктистова. Докл. АН СССР, 1961, 6, 2, 162.
2. B. B. Dunne. Phys. Fluids, 1961, 4, 7, 918.
3. B. B. Dunne. Phys. Fluids, 1964, 7, 10, 1707.
4. J. P. Argous, G. Peyre, I. Thouvenin. Proceedings Fourth Symposium (International) on Detonation, Washington, D. C., 1965.
5. B. D. Lambourn, P. W. Wright. Proceedings Fourth Symposium (International) on Detonation, Washington, D. C., 1965.
6. Ф. А. Баум, К. П. Станюкович, Б. И. Шехтер. Физика взрыва. М., Физматгиз, 1959.
7. H. M. Sternberg, D. Piacesi. Phys. of Fluids, 1966, 9, 7, 1307.
8. А. Н. Дремин, К. К. Шведов и др. Матер. III сессии Научного совета по народнохозяйственному использованию взрыва АН СССР. Днепропетровск, 1969.
9. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1966, 2, 4.
10. Н. М. Кузнецов, К. К. Шведов. ФГВ, 1967, 3, 2.
11. Бликней и Тауб. Вопросы ракетной техники, 1951, 1.
12. Г. А. Адауров, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1967, 3, 2.
13. G. R. Fowles, W. M. Hilsbell. J. Appl. Phys., 1965, 36, 4, 1377.

УДК 534.222.2

О ПОВЕРХНОСТНЫХ ЭФФЕКТАХ ПРИ КОСЫХ СОУДАРЕНИЯХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

А. А. Дерibas, И. Д. Захаренко

(Новосибирск)

В работе [1] были рассмотрены различные течения, осуществляющиеся при косых соударениях металлических пластин. Результаты исследований показали, что существует значительное разнообразие возможных конфигураций течения: течение с образованием кумулятивной струи, волнообразование, образование аномальной низкоскоростной струи и т. д.

В настоящей работе более подробно рассматривается вопрос о границе, определяющей в плоскости координат $\gamma - v_k$ (угол соударения — скорость точки контакта) область, в которой на поверхности соударяющихся пластин не наблюдается каких-либо поверхностных эффектов (рис. 1, I). В остальной части плоскости $\gamma - v_k$ наблюдаются характерные поверхностные явления, например, образование обратной струи, колебание поверхности раздела и т. д. (рис. 1, III). Определение этой границы имеет существенное значение для исследований по сварке металлов взрывом, так как при этом можно определить область существования соединения и выбрать оптимальный режим сварки, который, как правило, находится вблизи искомой границы.

В дальнейшем будем характеризовать соударение точками плоскости $\gamma - v_k$, где γ — угол соударения, v_k — скорость точки контакта.

Очевидно, что выбор γ и v_k в качестве основных параметров, характеризующих соударение, предполагает, что основные свой-

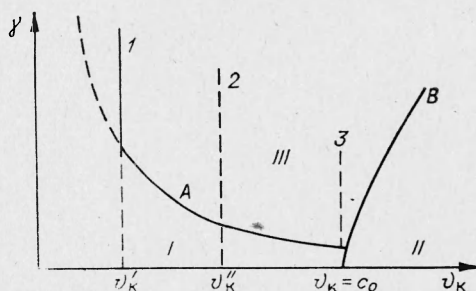


Рис. 1. Граница области струеобразования.

ства исследуемого течения имеют гидродинамический характер. В противном случае было бы более естественно ввести в качестве основных параметров какие-либо прочностные характеристики соударяющихся материалов, которые будем в дальнейшем изложении добавлять к выбранным основным параметрам γ , v_k по мере необходимости. Как правило, будет рассматриваться наиболее простой случай симметричных соударений плоских пластин, изготовленных из одинаковых материалов. Соударяющиеся пластины считаются достаточно длинными, чтобы параметры γ и v_k принимали стационарные значения в рассматриваемом режиме соударения. Участки нестационарности в начале и в конце соударения из рассмотрения исключаются.

В отдельных случаях будут сделаны замечания о свойствах несимметричных соударений в их связи с симметричными.

Описание различных типов течений

На рис. 1 схематически представлены области *I*, *II* и *III* на плоскости γ , v_k . Охарактеризуем основные свойства течений, возникающих при соударении, в каждой из этих областей.

Область I. Представляется совершенно очевидным, что должна существовать область режимов соударения, в которой наблюдаются лишь упругие или пластические деформации соударяющихся пластин без каких-либо специальных процессов на поверхностях, подобных волно- или струеобразованию. Как показано в работах [2, 3] уровень напряжений, возникающих в окрестности точки контакта, можно считать пропорциональным величине v_k^2 . Таким образом, при достаточно малых величинах скорости точки контакта появляющиеся напряжения не будут превосходить пределов упругости соударяющихся материалов. Аналогично можно определить критическую величину скорости точки контакта, соответствующую пределу пластичности материала и построить на диаграмме рис. 1 целое семейство прямых, параллельных оси γ , соответствующих различным прочностным характеристикам материалов. Следуя работе [4], примем за характеристику динамической прочности величину H_v — твердость по Виккерсу, и определим безразмерную константу ξ с помощью соотношения:

$$\xi = \frac{\rho v_k^2}{2H_v}. \quad (1)$$

Безразмерная величина выбрана таким образом, чтобы она определяла соотношение между прочностными силами, характеризующимися твердостью H_v и инерционными, оценивающимися комбинацией $\frac{1}{2} \rho v_k^2$. При анализе соударений положение линии, определяющей начало пластического течения в координатах $\gamma - v_k$, может быть приближенно оценено выражением $\xi = k_1$.

Уравнение границы области, где напряжения не превосходят предела у прочности, можно приближенно выразить соотношением

$$\xi = \frac{\rho v_k^2}{2H_v} = k_1. \quad (2)$$

Здесь k_1 — константа порядка единицы, подлежащая экспериментальному определению.

На рис. 1 показана также часть области *I*, ограниченная осью абсцисс, кривой *A*, кривой *B* и прямой *I*, определяемой формулой (2). В этой области напряжения, возникающие в окрестности точки контакта,

могут существенно превышать пределы прочности, и материал соударяющихся пластин может испытывать большие пластические деформации. Однако особенность, отличающая поведение материала в этой области от области, лежащей выше кривой *A*, состоит в том, что наблюдаемая здесь пластическая деформация более или менее равномерно распределена по объему соударяющихся пластин и никаких специальных явлений на соударяющихся поверхностях типа сварки, струе- или волнообразования не наблюдается. В дальнейшем определим критерий, позволяющий найти положение границы области *I* — кривой *A*.

Область II на рис. 1 соответствует режимам соударения, при которых в пластинах существуют ударные волны, связанные с точкой контакта. Впервые она была определена в работе [5], где было показано, что появление ударных волн в точке контакта неизбежно приводит к исчезновению кумулятивной струи как в осесимметричном, так и в плоском случаях. Положение кривой *B* определяется, если считать материал соударяющихся пластин сжимаемой жидкостью, характеризуемой уравнением адиабаты согласно данным по исследованию сжимаемости, опубликованных, например, в работах [6, 7]. Соответствующие вычисления для различных металлов опубликованы в работах [3, 5, 8].

Область III. Выше кривой *A* (см. рис. 1) расположены две области, разделенные линией 2 [1]. Область слева соответствует режимам, в которых граница раздела между пластинами после соударения ровная, а в области справа на поверхности раздела наблюдаются периодические волны. Однако, как будет показано ниже, эти области объединяет общее явление — наличие потока массы впереди точки контакта, поэтому часть плоскости, ограниченную кривыми *A* и *B*, будем рассматривать как одну область и исследуем ее более подробно.

Исследование потока массы металла, выносимого впереди точки контакта

Для определения массы металла, выносимой потоком вещества, движущимся впереди точки контакта, использовались различные методы.

1. В режимах, при которых поверхность раздела материалов оставалась прямолинейной, сваривались медные образцы толщиной 3,5 мм. На соударяющиеся поверхности этих образцов были нанесены слои никеля и меди толщиной 0,1 и 0,07 мм соответственно. Медь и никель брались с расчетом, обеспечивающим равенство удельных весов нанесенных слоев. Режим сварки выбирался таким, чтобы толщина выносимого материала не превосходила толщину нанесенного тонкого слоя меди. После сварки пластины разрезали перпендикулярно поверхности соударения и делали микрошлифы, на которых измерялась толщина оставшегося слоя меди.

При измерении толщины оставшегося слоя с помощью оптического микроскопа в нашем случае можно достичь точности порядка нескольких процентов, поэтому основную погрешность вносила неравномерность оставшегося слоя, которая в проведенных экспериментах составляла примерно 10%. Результаты экспериментов приведены в табл. 1, где дана расчетная толщина вынесенного слоя, равная толщине струи, определенной по формулам гидродинамической теории кумуляции. При расчетах использовалась величина γ , определяемая по формулам из работы [2], которые совпадают с экспериментальными данными с точностью порядка 20%.

2. В случае наличия волн на поверхности раздела пластин измерить толщину выносимого слоя с помощью описанного метода не удастся, так как происходит перемешивание слоев в зоне вихрей. Для определения

Таблица 1

γ , град	v_k , км/с	δ_1 , мк	δ_2 , мк	$\delta_{расч}$, мк
30	3	10—20	120—130	120
30	2,5	20—30	110—120	120
30	2,2	25—35	105—115	120

Примечание. δ_1 — толщина оставшегося слоя меди, δ_2 — толщина вынесенного слоя.

массы выносимого металла в случае волнообразования применялся следующий метод.

Часть поверхности соударения медных пластин заменялась слоем никеля толщиной 0,8 мм, который тщательно взвешивался и впаивался в предварительно сделанные углубления. После соударения медь растворялась, сваренные никелевые образцы снова взвешивались и определялась разница в их весе до и после соударения. Исследования микроскопиров показали, что при выбранной толщине никелевых пластин слой меди и никеля не перемешиваются и весь дефект массы можно с достаточной точностью отнести за счет выноса материала впереди точки контакта. Результаты экспериментов приведены в табл. 2, где расчетная величина $\delta_{расч}$ определена по формулам теории кумуляции и в этом случае достаточно хорошо совпадает с экспериментом.

Результаты экспериментов по измерению массы, выносимой впереди точки контакта, показывают, что как в случае волнообразования, так и при струеобразовании выносимая масса материала зависит только от угла соударения и неплохо совпадает с массой струи, рассчитанной по гидродинамической теории кумуляции. Аналогичные результаты получены в работе [9].

Измерение скорости потока. Исследование процесса соударения пластин в режимах, соответствующих безволновой области соударения, проводились с помощью рентгеноимпульсной установки по схеме, изображенной на рис. 2. Снимки процесса соударения (рис. 3) показывают наличие в точке контакта достаточно плотной струи и позволяют определить отношение скорости струи w к скорости точки контакта v_k как отношение пути l_2 , пройденного струей, к пути l_1 , пройденному точкой контакта. Результаты экспериментов представлены на рис. 4.

В режимах волнообразования обнаружить на рентгеновских снимках достаточно плотный поток массы впереди точки контакта не удается, однако при съемках на СФР вблизи точки контакта фиксируется облако дисперсных частиц [3]. При этом на мишени в экспериментальной схеме видна полоса поражения отдельными мелкими частицами (рис. 5), ширина которой зависит от режимов соударения пластин.

Эксперименты по определению ширины зоны поражения для различных режимов соударения медных пластин толщиной 3,5—4 мм

Таблица 2

γ , град	v_k , км/с	$\delta_{экс}$, мк	$\delta_{расч}$, мк
20	1,5	63	60
20	1,5	60	60
20	2	62	60
20	2	58	60
20	3	72	60
20	3	70	60
30	1,5	105	120
30	2	115	120

проводились во взрывной камере, которая перед подрывом вакуумировалась до давления порядка 1 мм рт. ст. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Рассмотрим процесс взаимодействия облака частиц и мишени при соударении пластин. Предположим, что частицы об-

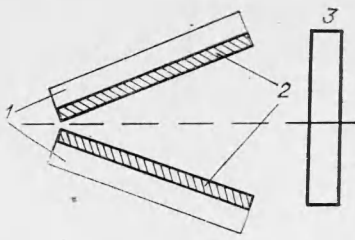


Рис. 2. Схема эксперимента.
1 — заряд ВВ; 2 — сходящиеся пластины; 3 — мишень.

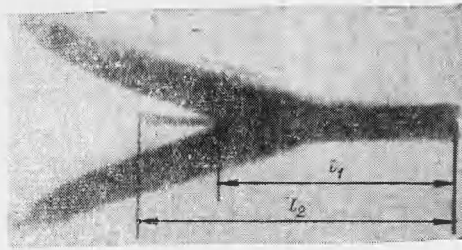


Рис. 3. Рентгенограмма процесса соударения.

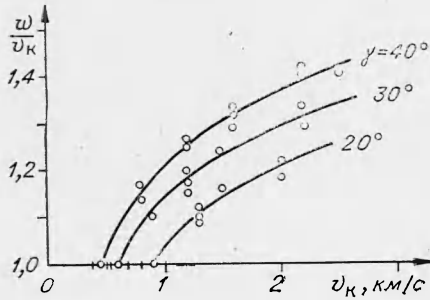


Рис. 4. Зависимость относительной скорости струи от v_k .

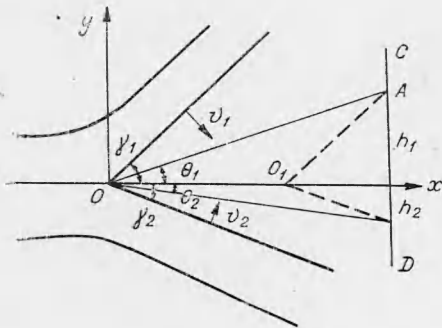


Рис. 6. Схема расчета скорости частиц.

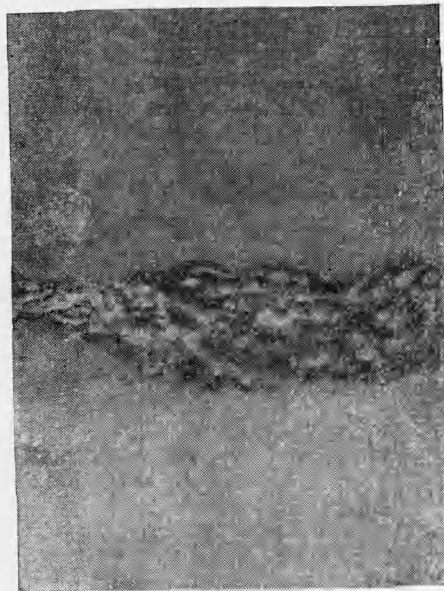


Рис. 5. Поражение мишени облаком частиц.

разуются с самого начала соударения, и их источником является точка контакта. Считаем, что частицы равномерно заполняют угол между пластинами и имеют одинаковую скорость w .

Рассмотрим наиболее общий случай, когда соударяются пластины разной толщины. Выберем систему координат так, чтобы ось x проходила по границе раздела соударившихся пластин (рис. 6). Обозначим γ_1 и γ_2 углы между осью x и верхней и нижней пластинами. θ_1 и θ_2 — углы между осью x и траекторией частиц. В выбранной системе

$$v_k = \frac{v_1}{\sin \gamma_1} = \frac{v_2}{\sin \gamma_2},$$

где v_1 и v_2 — скорость верхней и нижней пластины соответственно. Из треугольника OO_1A получаем

$$\frac{v_k}{\sin(\gamma_1 - \theta_1)} = \frac{w}{\sin(\pi - \gamma_1)},$$

отсюда

$$\sin(\gamma_1 - \theta_1) = \frac{v_k}{w} \sin \gamma_1$$

и соответственно

$$\sin(\gamma_2 - \theta_2) = \frac{v_k}{w} \sin \gamma_2.$$

Следовательно,

$$\theta_1 = \gamma_1 - \arcsin \frac{v_k}{w} \sin \gamma_1, \quad (3)$$

$$\theta_2 = \gamma_2 - \arcsin \frac{v_k}{w} \sin \gamma_2.$$

Для малых углов формулы (3) принимают вид:

$$\theta_1 = \gamma_1 \left(1 - \frac{v_k}{w}\right), \quad (4)$$

$$\theta_2 = \gamma_2 \left(1 - \frac{v_k}{w}\right).$$

Пусть на расстоянии L от потока соударения расположена мишень СД. Тогда

$$\theta_1 = \arctg \frac{h_1}{L},$$

$$\theta_2 = \arctg \frac{h_2}{L}, \quad (5)$$

где h_1 и h_2 — ширина зоны поражения мишени. Подставляя в (5) выражения (4), получим

$$\gamma_1 \left(1 - \frac{v_k}{w}\right) = \arctg \frac{h_1}{L}.$$

$$\gamma_2 \left(1 - \frac{v_k}{w}\right) = \arctg \frac{h_2}{L}. \quad (6)$$

Из выражения (6) получается

$$\frac{w}{v_k} = \frac{\gamma_1}{\gamma_1 - \arctg \frac{h_1}{L}} = \frac{\gamma_2}{\gamma_2 - \arctg \frac{h_2}{L}}. \quad (7)$$

Для симметричного случая можно записать:

$$\frac{w}{v_k} = \frac{\gamma}{\gamma - \arctg \frac{2h}{L}}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определить отношение скорости частиц к скорости точки контакта, если известны ширина зоны поражения мишени и расстояние от начальной точки соударения до мишени. Обработка экспериментальных данных представлена на рис. 7, 2.

Обсуждение результатов экспериментов. Как отмечалось в работе [1], соударение плоских металлических пластин сопровождается различными физическими явлениями на поверхности соударения пластин. Наиболее изученное и теоретически обоснованное поверхностное явление в этом случае — образование кумулятивной струи. Гидродинамическая теория кумуляции рассматривает соударение твердых тел как соударение струй идеальной жидкости и при достаточно больших скоростях соударения хорошо согласуется с экспериментальными данными. В то же время очевидно, что при малых скоростях соударения возможна такая ситуация, когда возникающие давления недостаточны для преодоления прочностных свойств материала (рис. 1, 1). Но поскольку поверхность материала не бывает идеально ровной, на ней всегда имеются отдельные частицы материала, связанные слабо с основной массой металла пласти-

ны. Во время соударения пластин эти отдельные частицы могут отрываться от основной массы материала и двигаться впереди точки контакта. Очевидно, что скорости этих частиц будут величиной случайной, зависящей от прочности связи с основной массой металла, размера частиц и каких либо других случайных величин. Будем называть эти частицы «случайными».

Как уже отмечалось, в теории кумуляции рассматривается процесс соударения двух струй идеальной жидкости. В этом случае по закону Бернулли скорости потоков до и после соударения должны быть равны, в то время как по закону сохранения импульса должны быть равны горизонтальные составляющие этих скоростей. Разность между горизонтальными импульсами соударившихся струй, вычисленную по этим двум законам, называют иногда «накопленным импульсом» [13], и этот импульс при соударении жидких струй компенсируется кумулятивной струей. В реальных материалах в процессе формирования струи возникают силы, стремящиеся затормозить кумулятивную струю. Так как величина накопленного импульса I_1 пропорциональна γ^2 и v_k^2 [14], то при больших углах и скоростях точки контакта импульс сил, возникающий в процессе деформации материала I_2 может быть существенно меньше, чем I_1 . При этом параметры реальной кумулятивной струи несущественно отличаются от рассчитанных по гидродинамической теории кумуляции. С уменьшением угла соударения и скорости точки контакта при некоторых значениях γ и v_k I_1 становится сравнимым с I_2 , и тогда скорость будет заметно отличаться от расчетной.

Выше описаны два метода измерения скорости частиц, движущихся впереди точки контакта при соударении пластин, однако ни один из этих методов не дает объективного критерия, позволяющего отличить случайные частицы от частиц материала, образующихся в процессе формирования струи. Сплошность — один из признаков, отличающих струю от отдельных частиц. Однако при малых углах соударения толщина образующихся струй сравнима с высотой микронеровностей поверхностей

Таблица 3

γ , град	v_k , км/с	$2h$, мм*	w/v_k
40	2,8	22	1,45
40	2,8	23	1,49
40	3,8	25	1,55
40	3,8	27	1,6
30	2,8	14	1,36
30	2,8	15	1,4
30	4,2	16	1,45
30	4,2	18	1,52
20	3,0	9	1,28
20	3,0	13	1,32
20	3,9	14	1,35
10	2,2	2	1,07
10	2,2	4	1,13
10	4,2	6	1,21
10	4,2	7	1,25

* $2h$ — ширина полосы поражения.

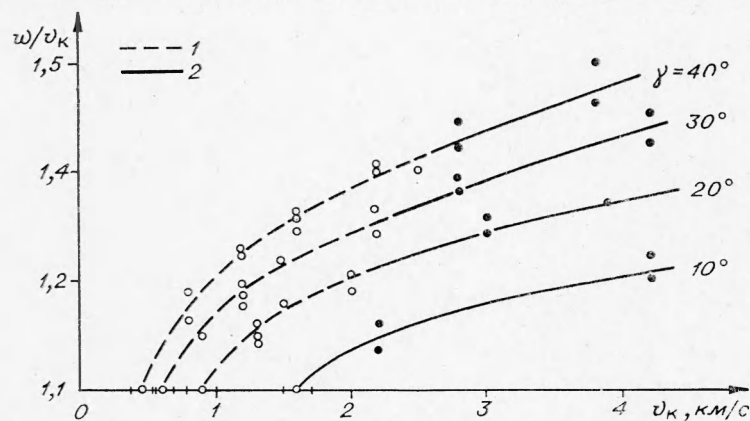


Рис. 7. Зависимость отношения w/v_k от v_k для струй (1) и для облака частиц (2).

используемых в экспериментах пластин (например, при $\gamma=30^\circ$ и толщине пластины 3 мм толщина струи порядка 100 мк), поэтому не следует ожидать устойчивого движения образующихся в такой ситуации струй на достаточно больших расстояниях. Флуктуации скорости струи, обусловленные наличием микронеровностей и другими факторами, приводят к быстрому разрушению струи, которая на рентгеновских снимках наблюдается в виде размытого потока частиц (см. рис. 3). По этой же причине невозможно отличить поражение мишени случайными частицами от поражения частицами разрушенной струи.

Поэтому описанный ниже способ построения границы, разделяющей области существования и отсутствия струи, является наиболее надежным. В координатах $\gamma - v_k$ строятся экспериментальные зависимости ω от v_k для некоторых фиксированных углов соударения. Точки пересечения этих кривых с осью v_k дадут значения координат точек границы области существования струи в координатах $\gamma - v_k$.

На рис. 7, 2 представлены результаты экспериментов по определению скорости облака частиц в волновом режиме соударения. На этом же графике нанесены кривые отношения скорости струи к скорости точки контакта, полученные рентгенографическим методом в струйных режимах соударения (рис. 7, 1). Из приведенных графиков следует, что кривые, описывающие ω/v_k при волновом режиме соударения, являются продолжением кривых, описывающих ω/v_k в зависимости от скорости точки контакта в режимах, при которых существует непрерывная струя.

Аналогичные результаты получены в работе [10], где рассматривается падение ударной волны на клиновидную полость. При этом в зависимости от угла клиновидной полости могут существовать два режима: струйный и волновой. В случае, если поверхности раздела после схлопывания клиновидной полости имеют волнообразную форму (для малых углов раствора клина), при съемках на СФР можно наблюдать облако частиц. При больших углах соударения образуется кумулятивная струя. Измерение скорости частиц и струи при схлопывании клиновидной полости показали, что в этом случае также имеется непрерывная зависимость скорости от угла раствора клиновидной полости.

Проведенные исследования скорости и выносимой массы позволяют сделать следующие выводы.

1. При малых углах и скоростях соударения металлических пластин возможно существование в точке контакта обратной струи, скорость которой существенно отличается от скорости, рассчитанной по гидродинамической теории кумуляции.

2. Непрерывная зависимость скорости потока от параметров соударения при переходе от струйных режимов к волновым, а также неплохое соответствие в том и другом случае толщины вынесенного слоя с толщиной струи, рассчитанной по гидродинамической теории кумуляции, свидетельствует о едином механизме образования обратной струи и облака дисперсных частиц.

Поэтому как обратную струю, так и облако частиц, возникающее в волновых режимах соударения, будем называть потоком массы впереди точки контакта.

Связь между образованием потока массы впереди точки контакта и сваркой взрывом

На рис. 7 приведены кривые зависимости отношения ω/v_k от скорости точки контакта для некоторых фиксированных углов. Пересечение этих кривых с осью v_k дает положение точек кривой, разделяющей плоскость $\gamma - v_k$ на две области (рис. 8). Область, лежащая выше кривой, соответствует режимам соударения, при которых существует поток

массы впереди точки контакта, в области ниже этой кривой $\omega/v_k < 1$ и упомянутый поток отсутствует. Если на график рис. 8 нанести экспериментальные точки, определяющие режимы сварки взрывом медных пластин, то окажется, что область существования сварки полностью лежит в области существования обратного потока массы и границы раздела этих областей совпадают.

С целью проверки этого предположения для других материалов проводились эксперименты по схеме рис. 2. На мишени фиксировались зона поражения и факт наличия или отсутствия сварки между образцами. Сварка всегда сопровождалась поражением мишени, т. е. наличием потока массы впереди точки контакта. В то же время отсутствие поражения мишени всегда сопровождается отсутствием сварки между образцами.

Все эти факты говорят о том, что необходимым условием сварки взрывом является присутствие потока массы впереди точки контакта, который приводит к самоочищению свариваемых поверхностей. На необходимость самоочищения поверхностей свариваемых материалов указывается также в работах [3, 11] и др. В дальнейшем будем считать установленным факт совпадения границ области сварки и области существования потока массы впереди точки контакта, и для определения положения границы области III (см. рис. 1) будем в основном использовать результаты по сварке металлов взрывом.

Определение положения кривой А. Опираясь на результаты экспериментальных исследований, изложенных выше, попытаемся определить положение кривой А (рис. 2), основываясь на ее свойстве отделять область возможной сварки взрывом от соударений, при которых самоочищения, а следовательно и сварки взрывом, не происходит. Для этой цели достаточно считать сваренными пластины, которые после соударения оказались соединенными между собой, и не интересоваться величиной прочности шва.

Имеющийся экспериментальный материал по определению критических режимов сварки относится к различным металлам, разным толщинам соударяющихся пластин, наряду с симметричными содержит несимметричные случаи. Для рассмотрения всех имеющихся данных с единой точки зрения воспользуемся соображениями теории размерности [12].

Можно записать уравнение кривой А в плоскости $\gamma - v_k$ для общего случая несимметричных соударений разных металлов в следующем общем виде:

$$\gamma = f(v_k; \delta_1; \delta_2; \rho_1; \rho_2; c_1; c_2; \sigma_1; \sigma_2; \nu_1; \nu_2; \dots). \quad (9)$$

Здесь δ_1, δ_2 — толщины соударяющихся пластин, которые предполагаются достаточно длинными, чтобы не рассматривать нестационарных участков; $\rho_1, \rho_2; c_1, c_2$ — плотности и скорости звука; σ_1, σ_2 — прочностные характеристики материалов пластин, имеющие размерность напряжения, которые должны некоторым образом зависеть от условий их деформирования, изменяющихся вдоль искомой кривой I (см рис. 1); ν_1, ν_2 — вязкости материалов пластин, определяемые для условий соударения, например, по методике [13]. Кроме того, в выражение (9) могут входить также теплофизические и другие характеристики соударяющихся материалов.

Пользуясь П-теоремой теории размерности, можно привести выражение (9) к безразмерному виду

$$\gamma = \Phi \left(\frac{\sigma}{\rho_1 v_k^2}; \frac{v_k \delta_1}{\nu_1}; \frac{\rho_1}{\rho_2}; \frac{c_1}{c_2}; \frac{\nu_1}{\nu_2}; \frac{\delta_1}{\delta_2}; \dots \right). \quad (10)$$

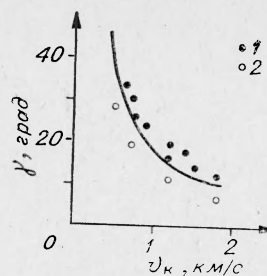


Рис. 8. Граница области струеобразования.
1 — сварка; 2 — сварки нет.

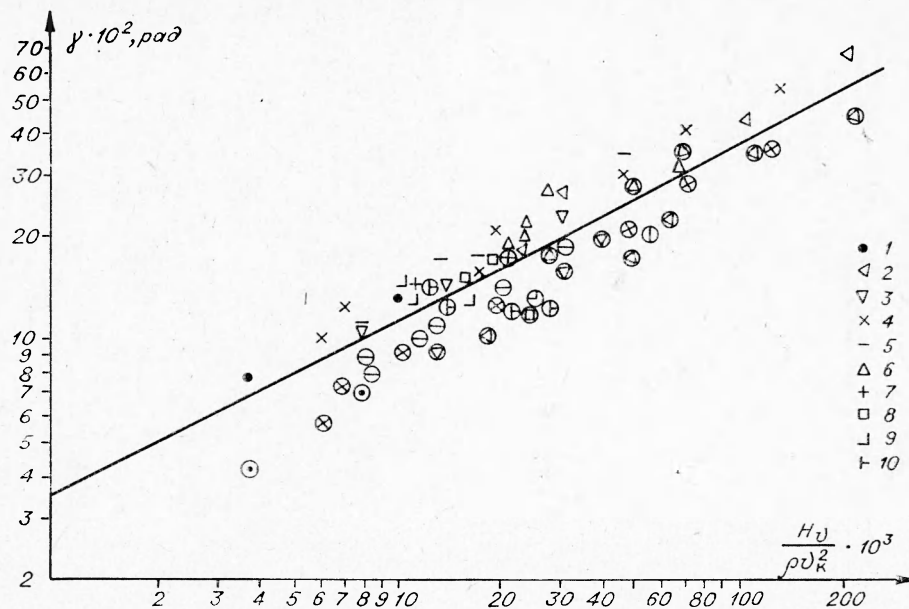


Рис. 9. Нижняя граница сварки взрывом (точки в кружках — сварки нет, точки без кружков — сварка).

1 — Pb+Pb; 2 — Al+Al; 3 — Cu+Cu; 4 — Ст. 3+Ст. 3; 5 — Ст. 3+IX18H9T [16]; 7 — отожженная сталь [17]; 8 — сталь+нержавеющая сталь [17]; 9 — латунь+сталь [17]; 10 — Al+сталь [17].

Для того, чтобы с помощью выражения типа (10) обработать имеющиеся экспериментальные данные, необходимо выбрать какие-либо конкретные величины в качестве σ_1 и ν_1 и с помощью формулы получить единую кривую для экспериментов, используя наименьшее количество переменных. Вопрос о выборе определенных величин σ_1 и ν_1 достаточно сложен, поскольку, как указывалось выше, они зависят от условий нагружения в точке контакта (в частности, от скорости деформирования, которая является некоторой функцией v_k и γ и изменяется при изменении режимов соударения). Следует также иметь в виду, что одновременная запись первых двух безразмерных комбинаций в выражении (10) произведена лишь из соображений формальной полноты, поскольку в действительности и вязкость, и динамическая прочность характеризуют одну и ту же способность материала необратимо сопротивляться динамической нагрузке. Для получения наиболее простой формулы, способной удовлетворительно описать имеющиеся экспериментальные данные, введем величину $\xi = \frac{\sigma}{\rho v_k^2}$, приняв за σ величину поверхностной твердости матери-

риала, измеряемую как обычно в единицах Виккерса.

Обработка экспериментальных данных разных авторов для соударений пластин различных толщин из разных материалов в симметричном и несимметричном случаях дает картину, приведенную на рис. 9. На плоскости $\gamma - \xi$ можно провести единую линию (прямоугольную в логарифмическом масштабе), с удовлетворительной точностью разделяющую области существования и отсутствия сварки. Отсюда следует, что все безразмерные константы в выражении типа (10), кроме $\xi = \frac{H_v}{\rho v_k^2}$, могут в первом приближении считаться несущественными, и положение кривой А на рис. 1 может быть определено с помощью формулы

$$\gamma = 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho v_k^2}}. \quad (11)$$

В случае соударения пластин из различных материалов для определения положения кривой A в выражении (11) в качестве H_v следует брать величину твердости наиболее твердого материала из-за необходимости очищения обеих соединяемых поверхностей. В качестве плотности в формуле (11) можно в первом приближении брать среднее арифметическое из плотностей материалов соударяющихся пластин, но полученные таким образом соотношения нуждаются в дополнительной проверке из-за недостаточности использованного экспериментального материала.

Выражение (11) может иметь существенное практическое значение, так как при величине угла соударения

$$\gamma > \gamma^* = 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho v_k^2}} \quad (12)$$

будем всегда попадать в область возможной сварки, а если рассчитанная таким образом точка не будет отходить слишком далеко от нижней границы области III, соединение должно быть достаточно прочным.

Аналогичная зависимость получена в работе [11], где в качестве характеристики прочностных свойств материала использован предел прочности при растяжении. Однако эксперименты по сварке дюралевых пластин, приведенные в работе [11], по-видимому, невозможно использовать для проверки выражения (12), так как обычно дюралевые листы перед прокаткой лакируют чистым алюминием, твердость которого существенно меньше твердости дюрала.

Границы применимости формул для расчета критических режимов

Рассмотренная задача о критерии сварки взрывом предполагает стационарность процесса соударения, так как в параметры, определяющие критический угол (9), входят только толщины соударяющихся пластин и не входят два других размера. Теория размерности не позволяет получить вид зависимости критического угла от параметров соударения. Эта зависимость получена в результате анализа экспериментальных данных различных авторов, большинство из которых не указывает длину и ширину свариваемых образцов, и расхождение некоторых экспериментов с предлагаемой зависимостью (11) можно объяснить влиянием этих двух факторов. Для достижения стационарного режима необходимо, чтобы длина и ширина свариваемых образцов была существенно больше их толщины, однако в любом случае избежать влияния нестационарных участков соударения не удастся, и это влияние будет тем больше, чем меньше линейные размеры образцов по сравнению с их толщиной.

При очень больших площадях свариваемых пластин могут возникать эффекты, связанные со значительным разогревом поверхности пластин воздухом, движущимся впереди точки контакта, что приводит к изменению механических свойств материалов.

Как показали эксперименты, наилучшим образом полученная зависимость (11) описывает границу сварки образцов, продольные размеры которых превосходят толщину метаемой пластины примерно на порядок. Для других соотношений толщины и продольных размеров возможны отклонения от полученной зависимости, однако в большинстве случаев эти отклонения незначительны.

При практических расчетах критического угла соударения по выражению (12) следует учитывать, что это необходимое условие сварки не является достаточным, так как, кроме рассмотренной в данной работе границы, существует также верхняя граница области сварки взрывом

Таблица 4

Материал	γ , град	v'_k , м/с
Ст. 3 ($H_v = 100$ кг/мм ²)	0,08	500
Углеродистая закаленная сталь ($H_v = 800$ кг/мм ²)	0,226	1400
Медь ($H_v = 60$ кг/мм ²)	0,07	360
Алюминий ($H_v = 40$ кг/мм ²)	0,088	550

[15], положение которой определяется тепловыми процессами, происходящими в сварном шве.

Представляет интерес проанализировать также, какая из кривых, ограничивающих область сварки, наиболее существенна для расчета режимов сварки. Наиболее часто на практике используются режимы сварки взрывом с дозвуковой скоростью точки контакта. Поэтому кривая *B* представляет практический интерес только в отдельных случаях.

Положение кривой *A* и прямой *I* (см. рис. 1), ограничивающих область сварки в дозвуковой области соударения, определяется прочностными свойствами материалов. Проще всего проанализировать положение прямой *I*, описываемой выражением (2), если считать $k_1 = 1$. Для большинства материалов эта прямая расположена довольно близко к началу координат. Так, для довольно твердой стали $H_v = 300$ кг/мм², $v_k = 800$ м/с. Скорости точки контакта меньше 1 км/с довольно редко применяются на практике, и значит, прямая *I* для обычных материалов не вносит существенного ограничения в режимы сварки. Поэтому расчет нижней границы сварки можно проводить только по выражению (12). Для очень прочных материалов все же необходима проверка выбранных режимов по выражению (2), так как возможно существование таких материалов, для которых v_k близко или даже больше скорости звука. В этом случае область сварки будет ограничена кривой *B* и прямой *I* (см. рис. 1).

С помощью выражения (12) можно найти для любого материала минимально возможный угол соударения, при котором еще может образоваться сварное соединение. Величина этого угла равна координате точки пересечения кривых *A* и *B*. Приближенно этот угол можно определить как точку пересечения кривой *A*, описываемой выражением (12), и прямой $v_k = c_0$

$$\gamma_{\min} = 1,14 \sqrt{\frac{H_v}{\rho c_0^2}}. \quad (13)$$

В табл. 4 приведены значения минимальных углов, вычисленные по выражению (13), и значения минимально возможных скоростей соударения, вычисленные по выражению (2) для некоторых материалов.

Экспериментальная проверка подобных выводов, отыскание и объяснение возможных аномалий может представить существенный интерес для понимания процесса сварки взрывом.

Поступила в редакцию
4/1 1974

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. 2-й Международный симпозиум по обработке металлов энергией взрыва, ЧССР, Маршанские Лазни, 1973.
2. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
3. G. Cowan. J. Appl. Phys., 1963, 34, 4.
4. Ф. Ф. Витман, Н. А. Златин, Б. С. Иоффе. ЖТФ, 1949, 19, 3.

5. J. Walch, R. Shreffler, E. Willig. J. Appl. Phys., 1953, 24, 3.
6. А. В. Альтшулер и др. ЖЭТФ, 1960, 38, 3.
7. J. M. Walsh, M. N. Rice a. o. Phys. Rev., 1957, 108, 2.
8. Г. Е. Кузьмин, И. В. Яковлев. ФГВ, 1973, 9, 4.
9. O. R. Bergman, G. R. Cowan, A. H. Holtzman. Trans. Met. Soc. AIME, 1966, 236, 6.
10. В. А. Симонов. Канд. дисс., Новосибирск, ИГ, 1972.
11. R. H. Wittman. The influence of collision parameters on the strength and microstructure of an explosion welded aluminium alloy. International simposium, Marianske Lazne, 1973.
12. Л. И. Седов. Методы подобия размерности в механике. М., «Наука», 1965.
13. С. К. Годунов, А. А. Дерибас и др. ФГВ, 1971, 7, 1.
14. С. К. Годунов, А. А. Дерибас. Докл. АН СССР, 1972, 202, 5.
15. И. Д. Захаренко. ФГВ, 1972, 8, 3.
16. W. Babul. Bulletin wojskowej akademii technicznej im J. Dabrowskiego, 1970, XIX, 5, 213.
17. H. K. Wylie, P. E. Williams, B. Crossland. The Queen's University of Belfast, 1970, 514.

УДК 539.389.2+620.18

УПРОЧНЕНИЕ НИКЕЛЯ УДАРНЫМИ ВОЛНАМИ И ЕГО РАЗУПРОЧНЕНИЕ ПРИ ПОСЛЕДУЮЩЕМ ОТЖИГЕ

В. Н. Сикоров, С. В. Першин
(Москва)

Понижение температуры квазистатической деформации металла ниже комнатной приводит обычно к увеличению твердости, удельного сопротивления, запасенной энергии и уменьшению среднего размера дислокационной ячейки [1—3]. Влияние понижения начальной температуры ударно-волновой деформации на свойства и структуру металлов почти не исследовано. В связи с этим в настоящей работе предпринято изучение этого явления на никеле, деформированном плоскими ударными волнами.

В работах [4—6] показано, что разупрочнение металлов при отжиге после ударно-волнового нагружения начинается при более высоких температурах или при большем времени отжига, чем после статической деформации до той же твердости или плотности дислокаций. В исследовании [7] установлено, что в ударно-деформированных фольгах никеля новые зерна при отжиге не образуются. Согласно данным [8, 6], разупрочнение ударно-деформированных массивных образцов никеля сопровождается появлением точечных рефлексов на обратных рентгенограммах, свидетельствующих о наличии в объеме образца областей, свободных от искажений. В настоящей работе было продолжено начатое в [6] изучение изменений при отжиге свойств и структуры никеля, деформированного квазистатически и ударными волнами различной амплитуды.

Исследовался поликристаллический никель вакуумной плавки чистотой 99,98%, отожженный в вакууме $\sim 5 \cdot 10^{-5}$ мм рт. ст. при 900°C в течение трех часов. Величина зерна в отожженных образцах составляла $\sim 0,3$ мм. Квазистатическая деформация осуществлялась в результате одноосного сжатия или медленной прокатки. Плоские ударные волны создавались алюминиевым ударником, разогнанным продуктами взрыва.

Физическое уширение линии $(311)_\alpha$ определялось методом аппроксимации. Ширину линии измеряли съемкой на дифрактометре УРС-50ИМ в $\text{Cu } K_\alpha$ -излучении при скорости счетчика 1/8 град/мин. Применялось