

О СТРУКТУРЕ КУМУЛЯТИВНОЙ СТРУИ, РЕАЛИЗУЮЩЕЙСЯ ПРИ КОСОМ СОУДАРЕНИИ ПЛОСКИХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛАСТИН

О. Б. Дреннов

РФЯЦ, ВНИИ экспериментальной физики, 607190 Саров

Исследована структура кумулятивной струи, образующейся при высокоскоростном косом соударении плоских металлических пластин. Показано, что в условиях проведенных экспериментов при симметричном косом соударении (обе пластины-metaются под углом навстречу друг другу) образуется компактная кумулятивная струя; при несимметричном косом соударении (метаемая пластина под углом соударяется с неподвижной) образуется диспергированная кумулятивная струя. Исключение составляют металлы, обладающие высокой динамической прочностью (уран, тантал). В режиме нагружения, когда скорость перемещения точки контакта меньше скорости звука, при косом соударении пластин формируется компактная струя.

Роль струеобразования в динамических процессах весьма существенна. Этот эффект проявляется при сварке металлов взрывом, при развитии сдвиговой неустойчивости по контактными границам слоев металлов, при кумуляции вещества.

В конкретных для каждой пары металлов условиях косоугольного соударения (скорости перемещения точки контакта v_c , угле соударения γ , давлении в окрестности точки соударения p_c) в точке их контакта формируется кумулятивная струя. Для струеобразования необходимы условия: $0 < \gamma < 90^\circ$ (реализация косоугольного соударения); $p_c > p_H$ (давление в окрестности точки контакта должно превышать упругий предел Гюгонио данного металла, т. е. должен быть обеспечен его переход в пластическое состояние); $v_c \leq c_0$ либо $v_c > c_0$, но при соударении под углом не должны формироваться присоединенные к точке контакта косые ударные волны [1, 2] (c_0 — скорость звука в данном материале).

В расчетах режим струеобразования при косом соударении слоев металлов описывается с позиций гидродинамики (соударение струй, кумуляция) [3]. Однако этот подход является упрощенным. Возникают неоднозначности, в частности, при трактовке режимов волнообразования при косом соударении, для устранения которых требуются искусственно вводимые ограничения и допущения [4].

В экспериментальном плане этот вопрос изучен недостаточно полно. Существует несколько работ, в которых собраны отрывочные сведения по характеру струеобразования при косом соударении. Так, в работе [4] утверждается, что в условиях развития волнообразования при косом соударении слоев металлов струя должна быть диспергированной, т. е. представлять собой облако независимых частиц. В экспериментах [5] с использованием метода импульсной рентгенографии зафиксировано отсутствие монолитной струи впереди точки контакта.

В то же время авторы работы [6] на основании двумерных газодинамических расчетов утверждают, что при дозвуковом нагружении струя всегда компактная. В сверхзвуковом режиме нагружения с отсоединенными косыми ударными волнами струя диспергированная.

Нами была проведена серия экспериментов, в которых исследовался процесс формирования кумулятивной струи при косом соударении плоских металлических слоев в широком диапазоне изменения скорости перемещения точки контакта ($v_c < c_0$, $v_c > c_0$). Использовалась традиционная схема постановки опытов, принятая для исследования контактных взаимодействий между металлами при нагружении косой ударной волной и при изучении процессов сварки металлов взрывом (рис. 1).

На массивном основании размещалась неподвижная пластина. Над ней под заданным углом α фиксировалась метаемая пластина. В опытах обе пластины имели одинаковые

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 99-01-00-812).

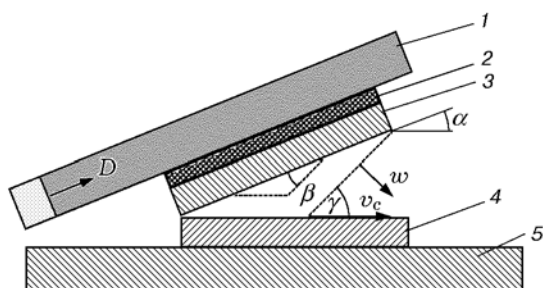


Рис. 1. Схема проведения опытов:

1 — слой бризантного взрывчатого вещества (ВВ), 2 — прокладка с малым акустическим импедансом, 3 — метаемая пластина, 4 — неподвижная пластина, 5 — массивное основание, α — начальный угол наклона метаемой пластины, β — угол ее разворота в полете, γ — угол ее соударения с неподвижной пластиной

размеры: $150 \times 75 \times 2$ мм. На метаемой пластине устанавливался заряд бризантного ВВ (пластифицированные ВВ на основе мелкодисперсного тэна, исходная плотность ВВ $\rho_0 = 1,5$ г/см³, скорость детонации заряда $D = 7,8$ мм/мкс), в котором инициировалась плоская скользящая детонационная волна. Между метаемой пластиной и слоем ВВ размещалась тонкая прокладка толщиной $\approx 0,5$ мм из материала с малым акустическим импедансом. Ее назначение — исключить возможное откольное дробление пластины в полете [7].

Обычно массивное основание изготавливалось из того же металла, что и метаемые пластины, и имело толщину ≈ 100 мм. В опытах, где металлись пластины из тантала и природного урана, массивное основание было выполнено из стали Ст. 3 толщиной ≈ 200 мм.

Для регистрации процесса струеобразования применялась методика импульсной рентгенографии. Использовалась установка, формирующая гамма-импульс с максимальной энергией $E_{\max} \approx 300$ кэВ, при средней энергии гамма-квантов $\langle E \rangle \approx 60$ кэВ [8]. Направление рентгенографирования в опытах перпендикулярно плоскости сборки (см. рис. 1). Момент рентгенографирования синхронизируется с моментом замыкания метаемой пластиной примерно половины линейного размера неподвижной пластины.

Во всех проведенных опытах параметры нагружения подбирались так, чтобы угол соударения пластин всегда оставался постоянным ($\gamma \approx 20^\circ$). Это позволяет сократить количество независимых параметров, влияющих

на физические процессы, происходящие на контактной границе металлов в условиях косоугольного соударения.

Поскольку для исследования всей обширной области углов соударения $0 < \gamma < 90^\circ$ требуется чрезвычайно большое количество опытов, фиксация постоянного угла соударения $\gamma = \text{const}$ (при переменной скорости перемещения точки контакта v_c) позволяет ограничить объем экспериментальных работ. Естественно, этот прием сужает область исследований и общность трактовки результатов, однако позволяет проследить закономерности трансформации кумулятивной струи для выбранного «луча» (угла соударения) в плоскости γ - v_c .

Давление нагружения в окрестности точки контакта для дозвукового режима косоугольного соударения рассчитывается по соотношению [9]

$$p_c = (1/2)\rho_0 c_0 w \cos \gamma,$$

где ρ_0 — плотность данного металла, w — скорость полета метаемой пластины.

При сверхзвуковом режиме косоугольного соударения состояние вещества в окрестности точки контакта характеризуется интенсивностью реализовавшихся косоугольных ударных волн.

В работе [10] выведено линейное приближенное соотношение, по которому можно определить давление в окрестности точки контакта при сверхзвуковом нагружении:

$$p_c = \frac{M^2}{\sqrt{M^2 - 1}} \rho_0 c_0^2 \text{tg } \gamma,$$

где $M = v_c/c_0$ — число Маха. Это соотношение получено при допущении, что сжатие ($\sigma = \rho/\rho_0$) равно предельному и невелико. Допущение справедливо для давления на фронте косоугольной ударной волны $p_c \leq 40$ ГПа.

Исходные данные и результаты экспериментов приведены в таблице, где δ — толщина соударяющихся пластин, R — отношение масс ВВ к массе метаемой пластины.

Материалы, использовавшиеся в опытах, можно условно разбить на три группы.

Группа 1 — малоплотные металлы (магний, алюминий). В опытах не удалось зарегистрировать кумулятивную струю в растворе угла соударения пластин (см. рис. 2, в таблице опыт № 2). Однако из условий нагружения и расчетно-экспериментальных представлений о процессе косоугольного соударения [1, 2] следует, что кумулятивная струя формируется. Действительно, при визуальном осмотре нагруженных

Номер опыта	δ , мм	R	γ , град	w , мм/мкс	v_c , мм/мкс	p_c , ГПа	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
Алюминиевый сплав АМЦ							
1	2	0,44	20	0,86	2,5	5,8	Струя не видна
2	2	0,55	20	1,03	3	6,7	— // —
3	2	0,81	20	1,37	4	9,2	— // —
4	2	1,13	20	1,70	5	11,4	— // —
5	2	1,5	20	2,10	6	12,5	— // —
6	2	2,0	20	2,40	7	14,5	— // —
Магний МА1							
7	2	0,35	20	0,72	2,2	2,6	Струя не видна
8	2	0,55	20	1,03	3	3,7	— // —
9	2	0,81	20	1,37	4	5,0	— // —
10	2	1,13	20	1,70	5	6,2	— // —
Сталь Ст. 3							
11	2	0,44	20	0,86	2,5	14,6	Облако пыли
12	2	0,51	20	0,98	2,9	16,6	— // —
13	2	0,55	20	1,03	3,0	17,5	— // —
14	2	0,94	20	1,54	4,5	26	— // —
15	2	1,50	20	2,10	6,0	28,5	Струя не видна
16	2	2,58	20	2,60	7,8	35,5	— // —
Медь М1							
17	2	0,33	20	0,69	2	11,2	Облако пыли
18	2	0,55	20	1,03	3	16,8	— // —
19	2	1,13	20	1,70	5	18,5	— // —
20	2	1,5	20	2,10	6	20,5	Струя не видна
21	2	2,0	20	2,40	7	24,5	— // —
22	2	2,58	20	2,60	7,8	29,5	— // —
Свинец С3							
23	2	0,16	20	0,36	1	3,8	Облако пыли
24	2	0,25	20	0,54	1,5	5,8	— // —
25	2	0,33	20	0,69	2	7,4	— // —
26	2	0,44	20	0,86	2,5	9,2	— // —
27	2	0,55	20	1,03	3	11	— // —
28	2	0,67	20	1,2	3,5	12,8	— // —
29	2	1,13	20	1,7	5	18,1	Струя не видна

1	2	3	4	5	6	7	8
Тантал ТВЧ							
30	2	0,25	20	0,54	1,5	14,3	Струя компактная
31	2	0,33	20	0,69	2	18,3	— // —
32	2	0,44	20	0,86	2,5	22,8	— // —
33	2	0,55	20	1,03	3	27,3	Струя не видна
34	2	0,81	20	1,37	4	36	— // —
Уран-238 природный							
35	2	0,25	20	0,54	1,5	11,8	Струя компактная
36	2	0,33	20	0,69	2	15,2	— // —
37	2	0,44	20	0,86	2,5	18,9	Облако пыли
38	2	0,55	20	1,03	3	22,6	— // —
39	2	0,67	20	1,2	3,5	26,3	— // —
40	2	0,81	20	1,37	4	30	— // —
41	2	0,94	20	1,54	4,5	33	Струя не видна
42	2	1,13	20	1,7	5	37	— // —
Алюминиевый сплав АМЦ, симметричное соударение							
43	2	0,27	40 (2 γ)	0,58	1,7	3,8	Струя компактная
44	2	0,38	40 (2 γ)	0,78	2,3	5,1	— // —
45	2	0,86	40 (2 γ)	1,44	4,2	9,4	— // —
46	2	0,98	40 (2 γ)	1,56	4,7	10,2	— // —
Сталь Ст. 3, симметричное соударение							
47	2	0,22	40 (2 γ)	0,48	1,4	8	Струя компактная
48	2	0,3	40 (2 γ)	0,62	1,8	10,3	— // —
49	2	0,44	40 (2 γ)	0,86	2,5	14,6	— // —
50	2	0,67	40 (2 γ)	1,19	3,5	19,8	— // —

образцов отмечено либо их сварное соединение, либо волнообразный вид поверхности контакта. По-видимому, струя представляет собой облако мелкодисперсной пыли, равномерно заполняющее зону при вершине угла соударения пластин. Из-за малой плотности исходного металла эта пыль не фиксируется рентгенографической установкой (чувствительность установки составляет $\rho l \geq 0,04$ г/см³, т. е. для надежного различения объект плотностью ≈ 4 г/см³ должен иметь размер не менее $l \approx 100$ мкм).

Группа 2 — материалы средней плотности (сталь, медь, свинец). В дозвуковом или сверхзвуковом с отсоединенными косыми ударными волнами режимах нагружения на рент-

генограмках фиксируется облако относительно мелких разрозненных частиц, приблизительно равномерно заполняющих раствор угла соударения пластин (см. рис. 3, в таблице опыт № 13). При увеличении скорости v_c размеры частиц в облаке уменьшаются. При $v_c < v_{cr}$ (v_{cr} характеризует условие присоединения косых ударных волн к точке контакта — реализуется режим бесструйного косоугольного соударения) облако частиц не фиксируется, хотя сохраняются необходимые и достаточные условия для формирования струи.

Группа 3 — высокоплотные материалы (уран, тантал). Для урана и тантала косое соударение со скоростями точки контакта $v_c \leq$

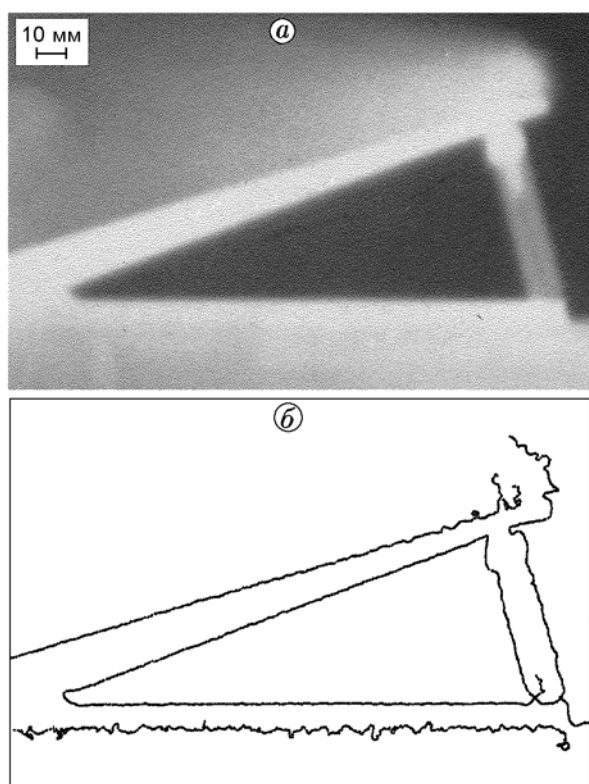


Рис. 2. Несимметричное косое соударение пластин из алюминиевого сплава АМЦ ($v_c = 3$ мм/мкс):

a — рентгеновский снимок; *б* — результат математической обработки по выделению контура

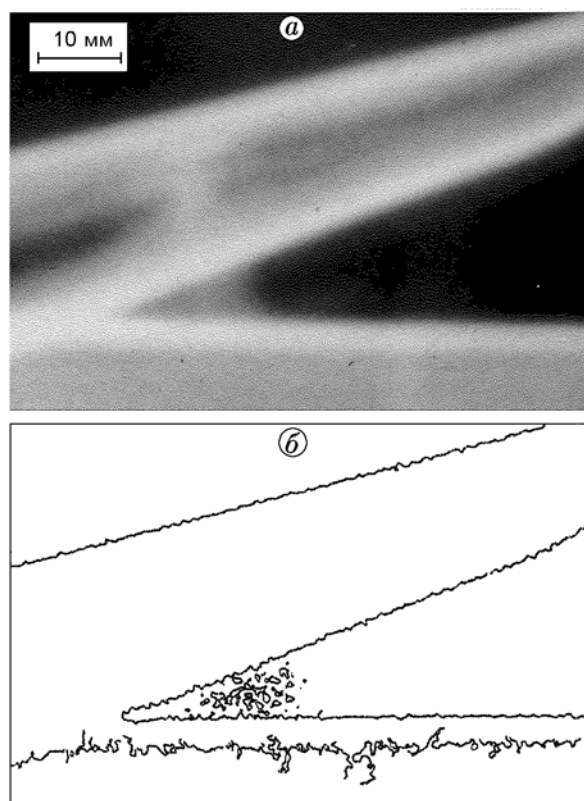


Рис. 3. Несимметричное косое соударение пластин из стали Ст. 3 ($v_c = 3$ мм/мкс):

a — рентгеновский снимок; *б* — результат математической обработки по выделению контура

2 мм/мкс и $v_c \leq 2,5$ мм/мкс соответственно сопровождается образованием относительно компактной кумулятивной струи (см. рис. 4, в таблице опыт № 36). Струя формируется ниже вершины угла, как бы на поверхности неподвижной пластины. Направление ее приблизительно параллельно биссектрисе угла соударения.

Увеличение скорости v_c приводит к размытию струи. Для урана при $2,5 \leq v_c \leq 4$ мм/мкс струя трансформируется в облако пыли вблизи вершины угла соударения. При $v_c > 4$ мм/мкс для урана и при $v_c > 3$ мм/мкс для тантала облако пыли в растворе угла соударения не фиксируется. Однако на контактной поверхности неподвижных пластин отмечены волнообразные возмущения.

На рис. 2–4 представлены также изображения процесса косого соударения пластин после математической обработки рентгенопленок по выделению характерных контуров. На них

наглядно представлены три стадии существования кумулятивной струи: сильнодиспергированный конгломерат мелких частиц; облако пыли; компактная струя.

Как уже отмечалось, по оценкам, выполненным согласно данным работ [1, 2], все приведенные опыты отвечают режимам формирования струи в точке контакта. Подтверждением этому служит и внешний вид сохраненных после опытов образцов (сварка взрывом, наличие волнообразных возмущений на контактной поверхности пластин).

В работе [11] отмечается, что с ростом скорости перемещения точки контакта v_c (при $\gamma \approx \text{const}$) увеличивается амплитуда возмущений на контактной границе соударяющихся металлов. Происходит это по следующим причинам. Возрастает напряжение в металлах в окрестности точки контакта, реализуются все более интенсивные сдвиговые деформации. Узкий (несколько микрометров) слой ме-

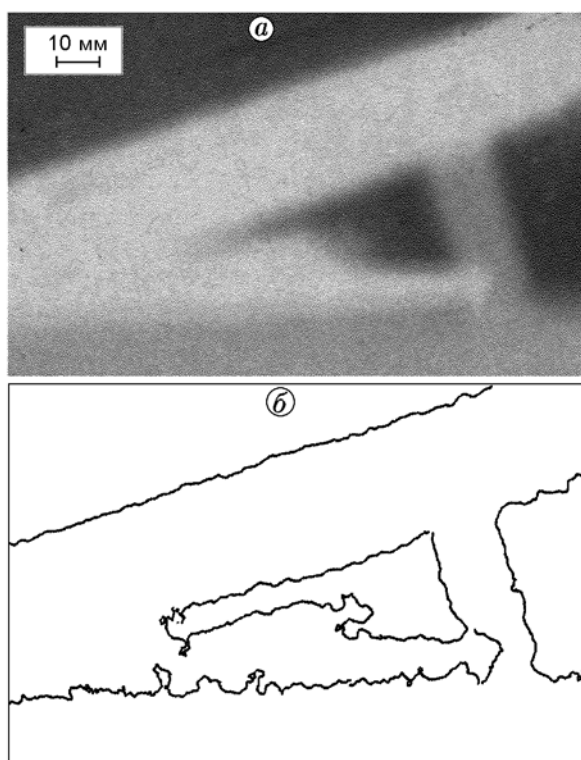


Рис. 4. Несимметричное косое соударение пластин из природного урана 238 ($v_c = 2$ мм/мкс):

a — рентгеновский снимок; *б* — результат математической обработки по выделению контура

талла плавится и переходит в жидкую фазу. Материал вблизи точки контакта теряет прочность в большем объеме, большая его масса переходит в пластическое квазижидкое состояние и, следовательно, в кумулятивную струю. При невысоких скоростях перемещения точки контакта напряжения вблизи точки соударения также невелики. Прочность металлов препятствует интенсивному развитию сдвиговых деформаций. В квазижидкое состояние переходит небольшой приграничный слой материалов, который и участвует в струеобразовании.

Полученные результаты могут быть систематизированы с учетом динамической прочности соответствующих материалов. Зависимости динамического предела текучести Y от давления нагружения p_c для ряда металлов взяты из работ [12, 13]. Если металл обладает высокой динамической прочностью (тантал, уран), то лишь тонкие приграничные слои металла плавятся и переходят в жидкое состояние. Глубинные слои практически не теряют прочности и не участвуют в процессе формиро-

вания струи. Струя образуется из тонких жидких слоев. Поэтому для металлов, обладающих высокой динамической прочностью, струя компактна при невысоких скоростях перемещения точки контакта (см. рис. 4).

В материалах, обладающих средней динамической прочностью (медь, сталь), в процессе косого соударения и развития интенсивных сдвиговых деформаций достаточно глубокие (до нескольких сотен микрометров) приграничные слои металлов переходят в пластическое квазижидкое состояние и участвуют в формировании струи. Однако, поскольку эти слои не являются реальным расплавом, их вклад в струю (формируемую из тонких слоев жидкой фазы) заключается в формировании множества отдельных частиц. Это облако частиц накладывается на струю и размывает ее (см. рис. 3).

Для металлов с малой динамической прочностью (алюминий, магний) описанный выше процесс интенсифицируется. С учетом того, что данные металлы обычно имеют малую плотность, облако частиц в данной постановке эксперимента вообще не фиксируется.

Такая же ситуация наблюдается для более плотных и прочных металлов при больших значениях v_c . Частицы становятся более мелкими и более скоростными, занимают существенно больший объем в растворе угла соударения. Линейная плотность облака частиц ρl резко снижается.

Анализ проведенных опытов показывает, что для всех обследованных материалов (исключение составляют уран и тантал) струя изначально диспергирована. В опытах реализованы условия нагружения $p_c \geq 5Y$. Иными словами, напряжения в точке контакта значительно превышают динамическую прочность материала. При косом соударении урановых и танталовых пластин ($v_c < c_0$) реализуется условие нагружения $p_c \approx 1,5Y$ и формируется компактная струя. При $v_c \geq c_0$ (режим с отсоединенными косыми ударными волнами) реализуется условие нагружения $p_c \approx 5Y$. Струя становится диспергированной.

По-видимому, для исследованных материалов при $p_c \approx 1,5Y$ следует также ожидать формирование компактной струи. Однако условие $p_c \approx 1,5Y$ для этих металлов реализуется при $p_c \leq p_H \leq 1$ ГПа, т. е. слишком малые напряжения в окрестности точки контакта вообще не могут привести к образованию куму-

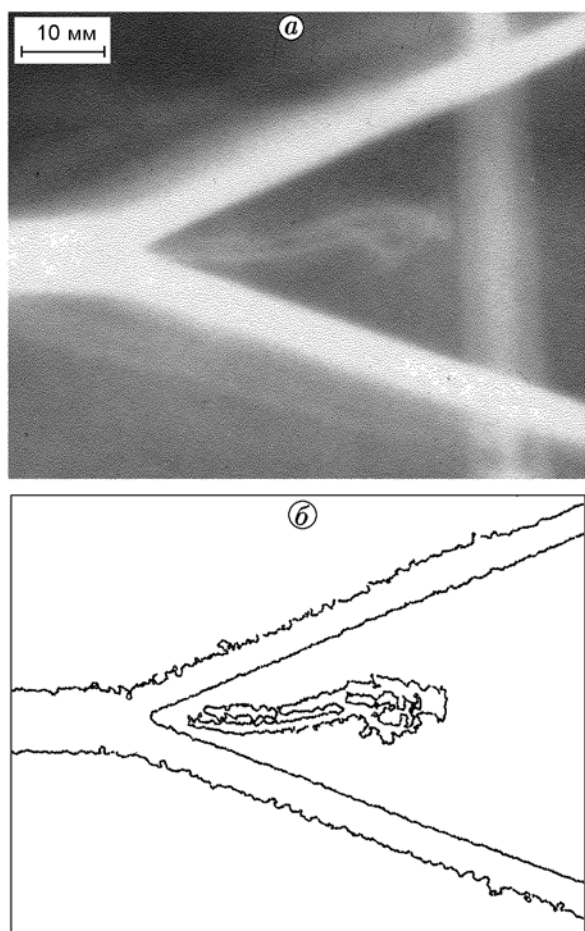


Рис. 5. Симметричное косое соударение пластин из алюминиевого сплава АМЦ ($v_c = 2,3$ мм/мкс, $2\gamma = 40^\circ$):

a — рентгеновский снимок; *б* — результат математической обработки по выделению контура

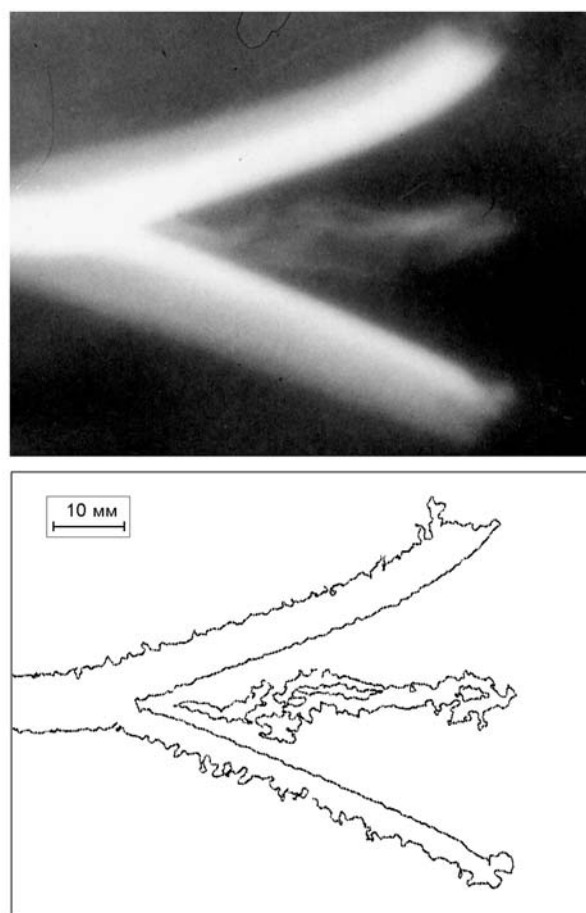


Рис. 6. Симметричное косое соударение пластин из стали Ст. 3 ($v_c = 1,8$ мм/мкс; $2\gamma = 40^\circ$):

a — рентгеновский снимок; *б* — результат математической обработки по выделению контура

лятивной струи.

Следовательно, для всех металлов кумулятивная струя, формирующаяся при косом соударении пластин, изначально (и постоянно) диспергирована. Только металлы, обладающие высокой динамической прочностью (на уровне урана и тантала), способны генерировать компактную кумулятивную струю при косом соударении, причем область существования компактной струи ограничена интенсивностью напряжений в окрестности точки контакта в интервале $1,5Y(p) \leq p_c \leq 5Y(p)$.

В специальной серии опытов было исследовано симметричное косое соударение тех же металлических образцов в случае, когда обе пластины-metaются под углом навстречу друг другу. Характерные рентгено снимки

и результаты математического выделения контуров приведены на рис. 5, 6 (в таблице опыты № 44 и № 48 соответственно). Эти опыты носили чисто сравнительный характер. Угол симметричного соударения пластин из алюминиевого сплава АМЦ и стали Ст. 3 постоянно равнялся $2\gamma = 40^\circ$, что было выбрано из соображений подобия, так как угол соударения метаемой пластины с неподвижной был равен $\gamma = 20^\circ$. Тем самым случайным образом был реализован стационарный режим симметричного косого соударения, когда образуется компактная кумулятивная струя [14]. Данный режим симметричного косого соударения металлических пластин ($20^\circ < 2\gamma < 80^\circ$ для стали; $30^\circ < 2\gamma < 80^\circ$ для алюминия [14]) подчиняется гидродинамическому описанию (аналогия

кумулятивному эффекту). Следует отметить, что во всех опытах данной серии образуется компактная кумулятивная струя и сказанное выше относится ко всей серии.

При несимметричном косом соударении (метаемая пластина под углом соударяется с неподвижной) согласие с гидродинамическим описанием нарушается, неподвижная пластина не может быть представлена в виде струи вязкой жидкости. Процесс струеобразования в данном случае характеризуется прочностными свойствами соударяющихся металлов, напряжением, реализующимся в окрестности точки контакта, и соотношением между этими параметрами.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cowan G., Holtzman A. Flow configuration in colliding plates: explosive bonding // J. Appl. Phys. 1963. V. 34, N 4. P. 928–939.
2. Уолш Д., Шрефлер Р., Уиллинг Ф. Предельные условия для образования струи при соударении на высоких скоростях // Механика. 1954. Т. 2, № 24. С. 87–103.
3. Биркгоф Г. Гидродинамика. Методы, факты, подобие. М.: Изд-во иностр. лит., 1963.
4. Дерibas А. А. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск: Наука, 1980.
5. Кудинов В. М., Коротеев А. Я. Сварка взрывом в металлургии. М.: Металлургия, 1978.
6. Pei Chi Chou, Carleone J., Karpp R. Criteria for jet formation from impinging shells and plates // J. Appl. Phys. 1976. V. 47, N 7. P. 2975–2981.
7. Глушак Б. Л., Новиков С. А., Погорелов А. П., Сеницын В. А. Исследование инициирования ТНТ и ТГ 50/50 ударными волнами малой длительности // Физика горения и взрыва. 1981. Т. 17, № 6. С. 90–95.
8. Павловский А. И., Кулешов Г. Д., Склизков Г. В. и др. Безжелезные сильноточные импульсные бетатроны // Докл. АН СССР. 1965. Т. 160, № 1. С. 68–70.
9. Botros K., Groves T. Fundamental impact-welding parameters — an experimental investigation using a 76-mur powder cannon // J. Appl. Phys. 1980. V. 51, N 17. P. 3706–3713.
10. Забабахин Е. И. Некоторые вопросы газодинамики взрыва. Челябинск: Челябинск. Дом печати, 1999.
11. Дреннов О. Б. О состоянии контактной границы слоев металлов в широком диапазоне изменения скорости косоугольного соударения // Физика горения и взрыва. 1991. Т. 27, № 2. С. 118–124.
12. Батьков Ю. В., Новиков С. А., Сеницына Л. М., Чернов А. В. Исследование сдвиговых напряжений в металлах на фронте ударной волны // Проблемы прочности. 1981. № 5. С. 56–59.
13. Батьков Ю. В., Глушак Б. Л., Новиков С. А. Прочность алюминия, меди и стали за фронтом ударной волны // Физика горения и взрыва. 1989. Т. 25, № 5. С. 126–132.
14. Годунов С. К., Дерibas А. А., Мали В. И. О влиянии вязкости материала на процесс образования струй при соударениях металлических пластин // Физика горения и взрыва. 1975. Т. 11, № 1. С. 3–18.

*Поступила в редакцию 24/І 2000 г.,
в окончательном варианте — 17/ІV 2000 г.*