

ЛИТЕРАТУРА

1. К. И. Козорезов, Л. И. Миркин, Н. Ф. Скугорова. Докл. АН СССР, 1973, 210, 5.
2. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
3. В. И. Кирко, Т. М. Соболенко. ФГВ, 1976, 12, 6.
4. А. Е. Войтенко. ПМТФ, 1968, 4.
5. А. Е. Войтенко, В. И. Кирко. ФГВ, 1975, 11, 6.
6. С. И. Анисимов, Я. А. Имас и др. Действие излучения большой мощности на металлы. М., «Наука», 1970.
7. А. В. Елецкий и др. Явления переноса в слабоионизированной плазме. М., Атомиздат, 1975.
8. Б. А. Урюков. Изв. СО АН СССР, сер. техн. наук, 1975, 2, 8.
9. Н. Н. Качанов, Л. И. Миркин. Рентгеноструктурный анализ. М., Машгиз, 1960.
10. И. В. Яковлев, А. Г. Вергасов. ФГВ, 1976, 12, 2.
11. E. E. Knepper. J. Appl. Phys., 1964, 35, 7.
12. А. Е. Вол. Строение и свойства двойных металлических систем. М., Физматгиз, 1972.

ХАРАКТЕР ВОЛНООБРАЗОВАНИЯ НА КРИСТАЛЛАХ ЦИНКА ПРИ КОСОМ СОУДАРЕНИИ

Д. К. Батороев, А. А. Дерибас, М. А. Могилевский

Процесс сварки, как известно, обычно сопровождается образованием волн на поверхности соударения [1]. По-видимому, совместная деформация металлов при образовании волн способствует образованию прочных связей на атомном уровне. Причина появления волн и связь этого процесса с параметрами соударения и прочностными свойствами соударяющихся металлов во многом еще остаются невыясненными [1—5]. В [1] предложено два критерия возможности волнообразования: 1) давление, развивающееся при соударении, должно превышать динамические пределы прочности соударяющихся материалов; 2) скорость точки контакта не должна превосходить скорости звука в соударяющихся пластинах.

В ходе экспериментов по косому соударению тонких медных пластин с моно- и бикристаллами цинка различных ориентаций был отмечен ряд особенностей, способствующих лучшему пониманию процессов, происходящих при волнообразовании.

Эксперимент проводился на гладкоствольной пороховой пушке с внутренним диаметром ствола 50 мм. Цинковый образец диаметром 40 и толщиной 5 мм крепился на дюралевом ударнике. После выхода из ствола образец ударялся о медную пластину толщиной 1 мм, установленную под заданным углом. Описываемые ниже результаты получены при следующих параметрах соударения: скорость ударника 400—700 м/с, угол соударения 20°. В таких режимах обычно образовывались довольно крупные волны, сварки же не было. Отсутствие сварки удобно для изучения параметров волн, так как не требуется изготовления шлифов или стравливания одного из металлов.

Монокристаллы цинка чистотой 99,99% выращивались по методу Бриджмена в графитовой форме. Образцы нужной ориентации вырезались из выращенного кристалла электроискровым методом. Поскольку двойникование является механизмом, характерным для высокоскоростной деформации, и двойниковые следы значительно проще наблюдать в микроскопе, чем следы дислокационного скольжения, ориентации кристаллов выбирались так, чтобы наиболее легкое в цинке базисное скольжение по плоскостям (0001) не могло внести определяющий вклад в волнообразование. Ряд интересных результатов был получен на

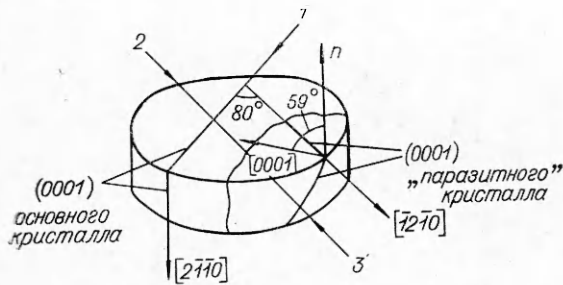


Рис. 1. Ориентации кристаллов цинка в бикристаллах. Стрелки указывают направление движения линии контакта в экспериментах согласно таблице.

бикристаллах — образцах, имевших сбоку небольшой кусок (примерно 1/4 сечения) «паразитного» кристалла другой ориентации. Ориентации кристаллов для этих образцов показаны на рис. 1.

В таблице приведены результаты по зависимости длины волн при соударении медной пластины с кристаллом цинка от условий соударения. Длина волн измеря-

лась в центральной части образцов, так как у краев, по-видимому, из-за боковой разгрузки волны сильно искажались, мельчали. Высота волн составляла обычно около 1/4 длины.

Зависимость длины волн от условий соударения. Многочисленные эксперименты по сварке различных поликристаллических металлов могут быть описаны следующим эмпирическим соотношением [1] между длиной волны λ и толщиной пластины δ :

$$\lambda = 26\delta \sin^2(\gamma/2) \text{ мм,}$$

т. е. длина волны оказывается зависящей в основном от угла соударения. Для наших экспериментов из этой формулы следовало бы ожидать длины волны равной 1 мм.

Эксперименты по соударению медных пластин с цинковыми кристаллами различных ориентаций показывают, что средний размер волн довольно близок к 1 мм, но имеется сильная зависимость размера волн от направления движения линии контакта. При соударении поверхностей в направлении 2 на рис. 1 (опыт 2) волны в «паразитном» кристалле вообще отсутствовали, хотя в основном кристалле были хорошо развиты (рис. 2). Естественны два предположения о возможных причинах такого отличия. Во-первых, это могло бы быть следствием упругой анизотропии кристаллов, если бы в «паразитном» кристалле режим соударения был сверхзвуковым. Однако оценка показывает, что этого нет. Скорость точки контакта была обычно около 1350 м/с. Скорости продольных волн в кристаллах цинка лежат в диа-

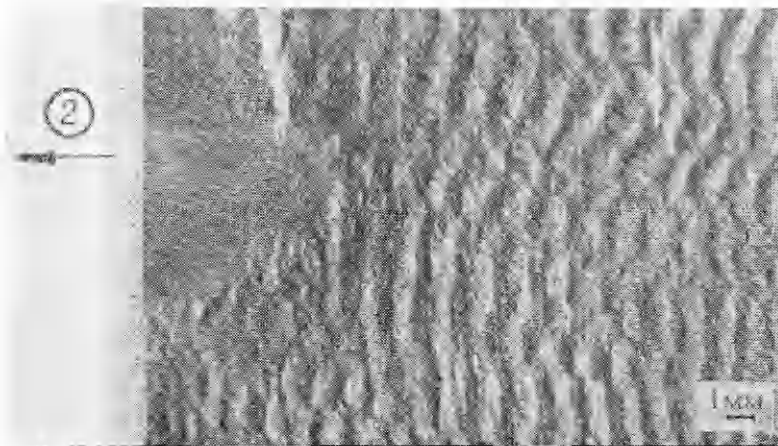


Рис. 2. Волны на медной пластине в опыте 2. Направление движения линии контакта указано стрелкой.

Номер опыта	Условия соударения				Длина волн, мм	
	Скорость метания, м/с	Угол соударения, град	Угол между направлением движения точки контакта и указанным направлением, град		в основном кристалле	в «паразитном» кристалле
			в основном кристалле	в «паразитном» кристалле		
1	510	20	90 с [0001]	80 с $[\bar{1}2\bar{1}0]$	1,7	1,2
2	500	20	190 с [0001]	0 с $[\bar{1}2\bar{1}0]$	1,6	волн нет
3	500	20	10 с [0001]	180 с $[\bar{1}2\bar{1}0]$	1,6	0,6
4	500	20	0 с [0001]	190 с $[\bar{1}2\bar{1}0]$	1,4	0,7
5	710	20	0 с $[000\bar{1}]$ соударение по $(\bar{1}100)$	—	1,0	—
6	420	20	0 с $[\bar{1}12\bar{3}]$ соударение по $(\bar{1}100)$	—	1,2	—

пазоне от 2970 м/с перпендикулярно базисной плоскости до 4770 м/с в базисной плоскости [6].

Другой возможной причиной зависимости размера волн от условий соударения может быть анизотропия пластических свойств кристалла. Для проверки этого предположения было проведено исследование характера развития сдвигов в кристаллах цинка. Для анализа напряженного состояния в цинке в процессе соударения использовалось изучение распределения двойников. В [7] такая методика была применена для изучения особенностей деформирования цинка при плоском ударном нагружении.

Последовательность развития сдвигов при образовании волны. На рис. 3 приведены фотографии распределения сдвигов в волне в опыте 6. Линия контакта двигалась в ходе соударения справа налево. Двойникование [8] в отличие от дислокационного скольжения возможно лишь в случае, когда в плоскости двойникования имеются касательные напряжения в направлении сдвига данной системы. При обратном направлении касательных напряжений двойникование в данной системе невозможно. Эта особенность позволяет в деформированном образце определять области, в которых касательные напряжения превышали некоторую критическую величину, необходимую для появления двойников (в цинке критические напряжения порядка $1 \div 10$ кг/мм² [8]). Двойники, уже имеющиеся в кристалле, являются сильными препятствиями для работающих систем сдвигов. Относительный размер двойников и характер их распределения позволяют по наблюдаемой структуре определить последовательность развития сдвигов.

Самые длинные следы, идущие из-под середины бугра вперед вниз, принадлежат системе $(\bar{1}\bar{1}02)$ $[\bar{1}\bar{1}0\bar{1}]$. Сдвиг по этой системе приводил к вдавливанию части кристалла, на которую давила пластина, относительно невозмущенной части образца.

Наиболее вероятное положение линии контакта для преимущественного зарождения этих систем находится в области середины — окончания подъема бугра. Рост их мог продолжаться и при дальнейшем перемещении линии контакта вплоть до начала нового бугра. В области начала бугра активно протекали сдвиги по двум системам двойникования $(0\bar{1}12)$ $[0\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$ и $(\bar{1}012)$ $[\bar{1}0\bar{1}\bar{1}]$. Сдвиг по первой из них также способствовал вдавливанию части кристалла, расположенной справа. Сдвиг по $(\bar{1}012)$ $[\bar{1}0\bar{1}\bar{1}]$ выносил материал вперед вверх, в волну. Из того, что у начала бугра двойники первой системы часто препятствовали образованию двойников второй степени, а затем менялись ролями, следует, что сначала уровень касательных напряжений был выше в системе $(0\bar{1}12)$ $[0\bar{1}\bar{1}\bar{1}]$, а затем в $(\bar{1}012)$ $[\bar{1}0\bar{1}\bar{1}]$. Наиболее вероятно, что эти сдвиги развивались при перемещении линии контакта в области окончания спада предыдущего бугра и начала роста нового.

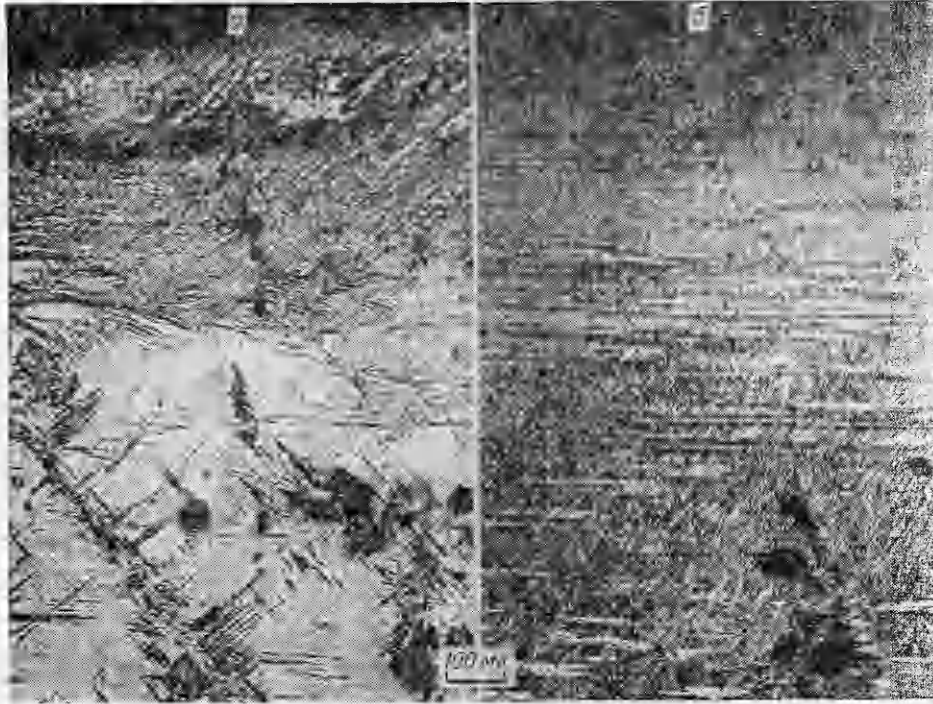


Рис. 4. Развитие сдвигов в основном (а) и «паразитном» (б) кристаллах в опыте 2. Сечение по плоскости базиса.

кристаллах, естественно, должна зависеть от ориентации. Слабая зависимость размера волн от скорости движения линии контакта при постоянном угле наблюдения в экспериментах на поликристаллических материалах и монокристаллах связана, видимо, с тем, что с увеличением скорости соударения возрастает уровень напряжений в материале (а следовательно, и интенсивность развития сдвигов); но, с другой стороны, уменьшается время на деформацию. С этой точки зрения отсутствие волн в начальной области соударения связано как раз со слабым развитием бугра перед линией контакта из-за малости времени развития сдвигов.

Поскольку последовательная активация различных систем сдвигов есть результат изменения напряженного состояния в металле в связи с перемещением линии контакта, выводы, полученные на монокристаллах, должны иметь место и для поликристаллических материалов в аналогичных условиях. Об этом свидетельствует также и совпадение средней длины волны, полученной на монокристаллах в экспериментах, с расчетной зависимостью от угла, полученной для различных поликристаллических материалов.

Отсутствие волнообразования в опыте 2. Подтверждением сдвиговой схемы волнообразования может служить анализ причины отсутствия волн на «паразитном» кристалле в опыте 2, когда на основном кристалле волны были хорошо развиты.

На фотографиях основного (рис. 4, а) и «паразитного» кристаллов (рис. 4, б) можно отметить следующие особенности структуры. В приграничной области основного кристалла активно развиты системы двойникования, работа которых способствует выдавливанию металла перед точкой контакта в волну. В «паразитном» кристалле, как следует из кристаллографического анализа, нет таких систем двойникования. Область у поверхности контакта деформирована много слабее, чем в ос-

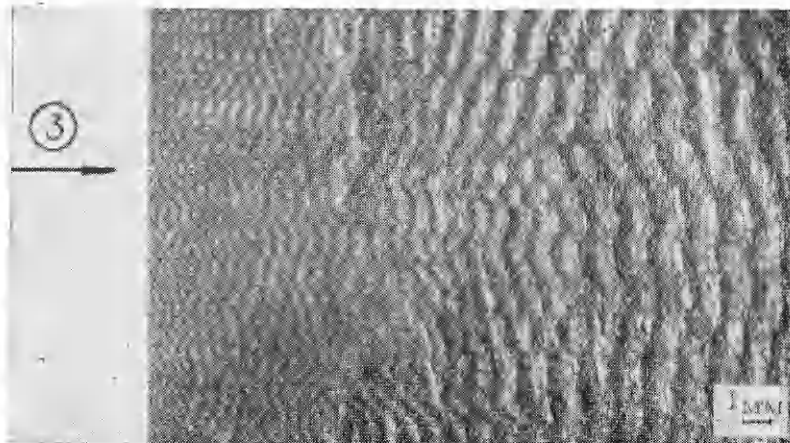


Рис. 5. Волны на медной пластине в опыте 3.

новном кристалле. В ней, действительно, не наблюдается следов систем, которые могли бы вызвать сдвиг материала в волну, в приповерхностной зоне имеется большое количество тонких двойников, параллельных поверхности.

Развитие бугра за счет сдвигов по системам небазисного скольжения блокируется двойниками, поскольку скорость их распространения порядка скорости сдвиговых волн, что превышает скорости движения дислокаций, а двойники препятствуют последующему скольжению [8].

Интересно отметить характерные различия в изменении распределения двойников по глубине в опыте 2. Высокие напряжения в области точки соударения в основном кристалле имели возможность релаксировать посредством развития сдвигов в волну. Поэтому количество двойников и объем материала в двойниках (а следовательно, и сдвиговая деформация) быстро затухают с глубиной (см. рис. 4, а). Уже на глубине порядка длины волны наблюдаются лишь единичные двойники. В «паразитном» кристалле вследствие невозможности релаксации напряжений в сторону свободной поверхности картина противоположная (см. рис. 4, б). Вблизи поверхности соударения наблюдается большое число тонких двойников, параллельных поверхности. Их длина и толщина заметно возрастают с глубиной (длина достигает 2 мм). С глубины примерно 1 мм все более активными становятся системы, соответствующие сдвигам вперед вниз, и на расстоянии $\sim 1,5$ мм от поверхности находится максимум развития сдвигов — почти во всем объеме кристалла образуются двойники.

И наконец, следует отметить проверочный эксперимент 3 (направление движения линии контакта 3 противоположно направлению соударения в опыте 2). Как показывает кристаллографический анализ, при таком соударении в «паразитном» кристалле имеется система двойниковая $(0\bar{1}\bar{1}2)$ $[01\bar{1}\bar{1}]$, которая могла бы способствовать выдавливанию металла в волну. И действительно, как видно из рис. 5, в «паразитном» кристалле появились волны, хотя длины их заметно меньше, чем у волн в основном кристалле. Приграничная область «паразитного» кристалла сильно деформирована, в волнах и под ними хорошо развиты двойники системы $(0\bar{1}\bar{1}2)$ $[01\bar{1}\bar{1}]$. Этот эксперимент однозначно подтверждает предположение о связи наблюдаемого эффекта с анизотропией развития пластических сдвигов, так как соотношение скоростей упругих волн не зависит от направления соударения.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас. Физика упрочнения и сварки взрывом. Новосибирск, «Наука», 1972.
2. Г. Абрахамсон. Тр. Амер. об-ва инж.-мех. Сер. Е, Прикладная механика, 1961, 28, 4, 45.
3. A. Bahrani, T. Black, B. Crossland. Proc. Roy. Soc. Ser. A, 1967, 296, 1445, 123.
4. G. R. Cowan, A. H. Holtzman. J. Appl. Phys., 34, 328.
5. S. K. Godunov, A. A. Deribas a. o. J. Comput. Phys., 1970, 5, 3.
6. P. C. Waterman. J. Appl. Phys., 1958, 29, 1190.
7. М. А. Могилевский. ФММ, 1969, 28, 3, 508.
8. М. В. Классен-Неклюдова. Механическое двойникование кристаллов. М., Изд-во АН СССР, 1960.

МЕТОДИКА ИМИТАЦИИ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ УДАРА КАМЕННЫХ МЕТЕОРИТОВ

В. П. Урушкин, Н. Н. Горшков, В. М. Титов

Для исследования метеоритного (высокоскоростного) удара в лабораторных условиях применяют легкогазовые баллистические установки [1] или взрывные системы на основе кумуляции продуктов детонации ВВ [2—4]. Ввиду больших динамических нагрузок в процессе разгона используемые методы не позволяют ускорять частицы из хрупких материалов (например, стекла). Но необходимость в экспериментах такого рода имеется, так как по современным данным не менее 80% всех метеоритов каменные [5]. Ниже изложена взрывная методика, разработанная для ускорения сферических частиц из стекла массой $5 \cdot 10^{-3}$ — $2 \cdot 10^{-1}$ г до скоростей 0,8—8 км/с.

Основа методики — принцип ускорения твердых частиц кумулятивным взрывом [2]. Известно, что при этом сферическая частица обтекается гиперзвуковым потоком (струей) продуктов детонации и ускоряется им. Скорость потока $u > D$, где D — скорость детонации (в излагаемых результатах ВВ — ТГ 50/50 соответственно $D = 7,65$ км/с). Условие сохранения частицы при разгоне определено в [6] при рассмотрении упругих деформаций сферы

$$\rho u^2 \leq 4,2\tau, \quad (1)$$

где ρ — плотность струи продуктов детонации; τ — величина критического касательного напряжения для материала частицы. В такой форме соотношение (1) справедливо для начального участка движения частицы, когда ее скорость близка к нулю. В дальнейшем вместо скорости потока u в (1) должна фигурировать разность скоростей потока и частицы в каждый момент времени.

Для ускорения металлических (стальных) частиц методом кумулятивного взрыва обычно используют трубчатые заряды из конденсированного ВВ [2, 3]. Максимальная скорость истечения продуктов детонации наблюдается при отношении внешнего и внутреннего диаметров заряда $c_2/c_1 \approx 3$ [3]; в этом случае $u \approx 10 \div 11$ км/с [7], а $\rho \approx 0,1 \div 0,15$ г/см³ [8]. Из (1) следует, что материал частицы должен выдерживать в импульсном режиме при разгоне напряжения $\tau \approx 200$ кг/мм². В данной работе стеклянные шары готовились по технологии оптического стекла (крон) без полировки поверхности; диаметр частиц $d_0 = 1,56 \div 5,2$ мм. Хотя для микрообразцов из кварца и стекла прочность на разрыв может достигать ≈ 500 кг/мм², для реальных разме-