

которая позволяет рассчитать также скорости теплоотвода в любом сечении образца и судить о возможности закалки материала в зоне сварного соединения.

Высокая начальная температура образца объясняется деформациями металла, которые происходят во время соударения пластин.

Поступила в редакцию
29/XII 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. А. А. Дерибас, В. М. Кудинов, Ф. И. Матвеенков. ФГВ, 3, 4, 1967.
2. K. Keller. Z. Metallkunde, 1967, 3, 85.
3. S. H. Corpeten, H. E. Otto. Trans Metallurg. Sol. AIME, 1967, 11, 1866.
4. И. Г. Абрамович, В. И. Левин. Уравнения математической физики. М., «Наука», 1964.
5. А. А. Шмыков. Справочник термиста. М., Машгиз, 1961.

УДК 541.13.03

ВОЗДЕЙСТВИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ДАВЛЕНИЙ НА ОКИСЛЫ IV В ПОДГРУППЫ

Г. А. Ададулов, О. Н. Бреусов, А. Н. Дремин,
В. Н. Дробышев, А. И. Рогачева

(Москва)

Исследование воздействия ударных волн на тугоплавкие окислы представляет интерес не только с точки зрения получения модификаций, термодинамически стабильных при высоких давлениях и способных к метастабильному существованию в нормальных условиях, но и с точки зрения накопления экспериментального материала по фазовым превращениям в динамических условиях, так как до настоящего времени не ясен вопрос, почему не все фазовые превращения, фиксируемые при статическом нагружении, реализуются при воздействии динамических давлений.

Предметом настоящей исследования были необратимые структурные изменения двуокисей титана, циркония и гафния после воздействия ударных волн различной амплитуды. Эти окислы характеризуются полиморфизмом как в нормальных условиях, так и при повышенных давлениях. Для двуокиси титана, кроме наиболее стабильного рутила, известны еще две модификации — анатаз и брукит, которые в интервале температур 600—800°С монотропно переходят в рутил [1]. Рентгеновская плотность рутила равна 4,28 г/см³, анатаза — 3,91 г/см³, поэтому повышение давления способствует превращению анатаза в рутил [2]. Дальнейшее повышение давления приводит к образованию еще более плотной модификации со структурой типа α —PbO₂ и рентгеновской плотностью 4,35 г/см³ [3]. Эта модификация, устойчивая до 550°С, была получена также и при импульсном нагружении рутила [4, 5]. Двуокиси циркония и гафния при нормальном давлении кристаллизуются в моноклинных формах [6, 7], которые обратимо превращаются в высокотемпературные тетрагональные при 1200 [8] и 1900°С [9, 10] соответственно. При высоких давлениях тетрагональная модификация двуокиси циркония становится устойчивой при комнатной температуре [11]. Фазы вы-

сокого давления окислов циркония и гафния имеют ромбическую структуру [12].

Для исследования использовались: двуокись титана квалификации ч. и о. с. ч. для анатаза и рутила соответственно, и окислы циркония и гафния высокой чистоты. Рентгенофазовый анализ (медное фильтрованное излучение, камеры типа РКД и РКУ, промер на компараторе типа ИЗА-2) показал, что все исходные вещества были однофазны. Измеренные в толуоле пикнометрические плотности были равны $3,840 \pm \pm 0,004 \text{ г/см}^3$ для анатаза, $5,683 \pm 0,004 \text{ г/см}^3$ для двуокиси циркония и $9,615 \pm 0,004 \text{ г/см}^3$ для двуокиси гафния. Микрорентгенооптический анализ двуокиси циркония подтвердил однофазность этого препарата, причем средний показатель преломления слабо двупреломляющих кристаллов был равен $\bar{n} = 2,08$.

Ударное сжатие веществ осуществлялось в основном по методике сохранения цилиндрических ампул [13] с применением различных ВВ. В работе [14] было показано, что даже в пористых веществах в использованной схеме сохранения возможно образование трехударной конфигурации, причем скорость головной волны на стационарном участке близка к скорости детонации применяемого заряда ВВ. В настоящей работе исследовались образцы различной пористости, ударные адиабаты которых неизвестны, поэтому не представлялось возможным оценить параметры ударного сжатия даже в проходящей ударной волне. За характеристику ударного воздействия принимались значения скоростей детонации D использованных ВВ: 7,90; 6,90; 6,60; 4,80 и 4,40 км/сек. В некоторых случаях применялось повторное сжатие образцов в цилиндрических ампулах. Для создания более контролируемых условий сжатия иногда применяли сборку, в которой образец подвергался действию плоской ударной волны. Степень заполнения ампул (отношение насыпной плотности к пикнометрической) изменялась от 0,39 до 0,55. Свойства сохраненных образцов исследовались из различных участков, которые по аналогии с [13] обозначаются зонами I, II и III.

Результаты рентгеновского исследования двуокиси титана после нагружения ударными волнами, генерируемыми ВВ разной мощности, приведены в таблице, где исходное вещество — анатаз.

В результате ударного сжатия наблюдался переход анатаза в рутил. Полнота этого перехода зависела от амплитуды ударной волны и увеличивалась при переходе к более мощным ВВ. Однако оказалось, что степень перехода анатаза в рутил зависит не только от амплитуды ударной волны, но и от материала вкладыша ампулы: степень перехода увеличивалась при использовании медных вкладышей вместо железных. Возможно, что это связано с большей пластичностью меди, а следовательно, и с возникновением более высоких значений остаточных температур.

Наряду с фазовым переходом анатаза в рутил в большинстве случаев (за исключением опытов с применением наиболее мощных и наиболее слабых зарядов ВВ) наблюдалось образование фазы высокого давления TiO_2 — II. Максимальная степень перехода анатаза в эту модификацию отмечена после повторного воздействия заряда с $D = 6,90 \text{ км/сек}$ (зона III). Пикнометрическая плотность образцов двуокиси титана при повторном сжатии соответственно увеличивалась. Для образцов из зоны I она составляла $3,85 \text{ г/см}^3$, из зоны II — $3,90 \text{ г/см}^3$, из зоны III — $4,045 \pm 0,004 \text{ г/см}^3$.

Двуокиси циркония и гафния после однократного воздействия перечисленных выше зарядов существенных структурных изменений не претерпевают. Однако если при воздействии зарядов с небольшими значениями D диффузность линий на рентгенограммах образцов существенно

увеличивается, что свидетельствует о возникновении большого количества дефектов решетки, то при использовании более сильного заряда ($D=7,90$ км/сек) качество рентгенограмм даже улучшается, очевидно, из-за более высоких значений остаточных температур. Пикнометрическая плотность дефектных образцов (например, после ударного нагружения зарядом с $D=6,60$ км/сек) уменьшается. Так, например, для двуокиси циркония плотность образца из зоны I была равна $5,654 \pm 0,003$ г/см³, из зоны II — $5,649$ г/см³, а для двуокиси гафния из зоны II — $9,506$ г/см³.

D , км/сек	Зона	Анаказ*	Рутил	TiO ₂ -II
4,80 (ампула вакуумирована)	I	+	—	—
	II	+	—	—
	III	+	—	—
6,90 и 4,80 (последовательное сжатие)	I	+	?	+
	II	+	—	+
	III	+	+	+
6,90 (железный вкладыш)	I	+	—	+
	II	+	+	+
	III	+	+	+
6,90 (медный вкладыш)	I	+	+	+
	II	+	+	+
	III	—	+	+
6,90 (двукратное сжатие)	I	+	—	+
	II	+	+	+
	III	+	+	+
7,90	I	—	+	—
	II	—	+	—
	III	—	+	—

* Знаки «+» и «—» обозначают наличие или отсутствие соответствующей модификации.

Микрокристаллооптический анализ двуокиси циркония, подвергнутой действию заряда с $D=7,90$ км/сек, показал, что основная масса образца состояла из анизотропных кристаллов с $N_p = 2,07$, $N_g = 2,10$. В то же время имелись зерна с показателем преломления, превышающим величину $n=2,10$. Природа этих кристаллов в настоящее время не установлена. Принимая во внимание возможность отжига фаз высокого давления, были проведены опыты в условиях, способствующих уменьшению величин остаточных температур. С этой целью анатаз подвергался ударному сжатию ($D=4,80$ км/сек) после предварительного вакуумирования ампулы с образцом. При этом перехода анатаза в рутил не наблюдалось. Не было обнаружено также и фазы высокого давления. Эти результаты свидетельствуют о заметном влиянии воздуха, находящегося в порах исследуемого вещества, на величину остаточной температуры. Ударное нагружение окислов циркония и гафния плоской ударной волной ($p=80$ кбар) также не привело к каким-либо существенным структурным изменениям, даже если ампулы с образцами предварительно охлаждались до температуры жидкого азота.

Таким образом, при действии динамических давлений на окислы титана, циркония и гафния проявляют себя все три основных фактора динамического сжатия: большие градиенты давления, высокие динамические давления и высокие остаточные температуры. Большие градиенты давления при сравнительно низких амплитудах ударных волн приводят к существенному повышению дефектности кристаллической решетки окислов, что отражается на уменьшении пикнометрической плотности и увеличении диффузности диффракционных линий. Высокие динамические давления в случае двуокиси титана вызывают частичный переход анатаза в фазу высокого давления. Высокие остаточные температуры обуславливают переход анатаза в рутил, а при больших амплитудах ударных волн — отжиг фазы высокого давления и дефектности, создаваемой фронтом ударной волны. В связи с этим следует отметить, что динамическое сжатие рутила зарядом ВВ с $D=6,60$ км/сек в цилиндрических ампулах сохранения не приводит к образованию фазы высокого давления, в отличие от данных [4, 5], где динамическое сжатие осуществлялось в плоских ампулах, характеризующихся значительно меньшими пластическими течениями вещества и, следовательно, меньшими остаточными температурами.

Поступила в редакцию
4/III 1970

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Реми. Курс неорганической химии. М., «Мир», 1966, стр. 59.
2. F. W. Vahldiek Electron Microscopy, 1966, 1, 443.
3. Н. А. Бенделиани, С. В. Попова, Л. Ф. Верещагин. Геохимия, 1966, 5, 499.
4. G. Robert. Science, 1967, 3768, 1401.
5. R. K. Linde, P. S. DeCarli, J. Chem. Phys. 1969, 50, 319.
6. O. Ruff, F. Ebert, Z. Anorg. Allgem. Chem., 1929, 180, 19.
7. T. D. McCullough, K. N. Trueblood. Acta Crystallogr., 1959, 12, 7.
8. C. T. Lynch, F. W. Vahldiek, L. B. Robinson, J. Am. Ceram. Soc., 1961, 44, 147.
9. C. E. Curtis, L. M. Doney, I. R. Johnson, J. Am. Ceram. Soc., 1954, 37, 458.
10. А. Г. Богданов, В. С. Руденко, Л. П. Макаров. Докл. АН СССР, 1965, 160, 1065.
11. G. L. Kulcinski. J. Am. Ceram. Soc. 1968, 51, 582.
12. Н. А. Бенделиани, С. В. Попова, Л. Ф. Верещагин. Геохимия, 1967, 6, 677.
13. Г. А. Ададунов, О. Н. Бреусов и др. ФГВ, 1966, 2, 4, 130.
14. Г. А. Ададунов, А. Н. Дремин и др. ФГВ, 1967, 3, 2, 281.

УДК 621.789+669.018.25

ВЗРЫВНОЕ УПРОЧНЕНИЕ МЕТАЛЛОКЕРАМИЧЕСКОГО ТВЕРДОГО СПЛАВА

Э. Ш. Чазелишвили
(Новосибирск)

Структурные изменения в металлах и сплавах, связанных с протеканием пластической деформации при ударном нагружении, приводят в ряде случаев к заметному упрочнению, что уже нашло применение в про-