

07

Сопротивление динамическому деформированию и разрушению тантала с различной зеренной и дефектной структурой

© С.В. Разоренов¹, Г.И. Канель², Г.В. Гаркушин¹, О.Н. Игнатова³

¹ Институт проблем химической физики РАН,
Черноголовка, Московская обл., Россия

² Объединенный институт высоких температур РАН,
Москва, Россия

³ Российский федеральный ядерный центр—Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики,
Саров, Нижегородская обл., Россия

E-mail: garkushin@ficp.ac.ru

(Поступила в Редакцию 19 сентября 2011 г.)

Представлены результаты измерений прочностных свойств технически чистого тантала в условиях ударно-волнового нагружения. Уменьшение размера зерна путем интенсивной пластической деформации привело к возрастанию твердости материала примерно на 25%, но регистрируемые в экспериментах значения динамического предела текучести у мелкозернистого материала оказались меньшими, чем у исходного крупнозернистого. Эффект объяснен более высокой скоростью релаксации напряжений в мелкозернистом материале. Упрочнение тантала воздействием ударной волны с давлением 40–100 GPa привело к дальнейшему росту скорости релаксации напряжений, падению динамического предела текучести и исчезновению различия его значений для крупнозернистого и мелкозернистого материала. Откольная прочность тантала возрастает примерно на 5% с уменьшением размера зерна и не изменяется после ударно-волнового воздействия. Максимальные разрушающие напряжения реализованы в монокристаллах тантала.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 08-02-00087а) и Госкорпорации „Росатом“ в рамках государственного контракта № Н.4е.45.03.09.1073.

1. Введение

Известно, что пластическая деформация приводит к упрочнению металлов и сплавов вследствие накопления деформационных дефектов [1] и в случае больших деформаций уменьшения размера зерна [2–4]. С другой стороны, данные о влиянии этих факторов на напряженное течение и прочность материалов в условиях высокоскоростного деформирования [5–8] весьма немногочисленны и противоречивы. В то время как твердость, предел текучести и предел прочности, измеряемые при низкоскоростном деформировании, возрастают после интенсивной пластической деформации или ударно-волнового воздействия на материал, изменение сопротивления высокоскоростному деформированию и разрушению может не наблюдаться или даже иметь обратный знак. Между тем развитие моделей высокоскоростного деформирования и разрушения и построение соответствующих определяющих соотношений, необходимых для расчетов интенсивных импульсных воздействий, невозможны без четкого понимания вкладов различных структурных факторов в эти процессы в широком диапазоне длительностей нагрузки. С целью восполнить этот пробел в рамках настоящей работы проведены систематические исследования поведения тантала с разным размером зерна и различной дефектностью в условиях ударно-волнового нагружения.

Интерес к динамической прочности тантала связан с его практическим использованием в конструкциях, функционирование которых сопряжено с сильными импульсными воздействиями (например, в условиях взрыва и высокоскоростного удара). Тантал имеет объемно центрированную кубическую структуру кристаллической решетки, плотность 16.6 g/cm³, температуру плавления 3287 K и отличается сочетанием высокой твердости с высокой пластичностью. Исследованиям упруго-пластических свойств и откольного разрушения тантала при ударно-волновом нагружении посвящено довольно много работ [9–22], которые, однако, оставляют неясным вопрос о влиянии структурных факторов на эти процессы. Динамический предел упругости тантала по разным данным варьируется от 1.5 до 4.5 GPa, откольная прочность — от 5 до 10 GPa. Металлографический анализ образцов тантала после ударно-волнового воздействия [21] показал, что, начиная с давления ударного сжатия между 7 и 14 GPa, в материале появляются двойники, объемная доля которых возрастает с увеличением давления до 45 GPa. Двойникование монокристаллов сильно зависит от направления ударной нагрузки относительно кристаллографических осей тантала [22]. Откольная прочность несколько возрастает с уменьшением размера зерна и может значительно варьироваться даже в пределах одного образца. При этом разрушение зарождается на межзеренных границах; по мере роста исходные межзеренные микротрещины трансформируются в округлые

Таблица 1. Твердость тантала в различном структурном состоянии

Вид образца	Твердость, HRB
Исходный, крупнокристаллический (CG)	76–79
Субмикрокристаллический (UFG)	103–104
Монокристаллический	68
Крупнокристаллический после ударного сжатия (~ 40 GPa)	103
Крупнокристаллический после ударного сжатия (~ 100 GPa)	97–99
Субмикрокристаллический после ударного сжатия (~ 40 GPa)	104–105
Субмикрокристаллический после ударного сжатия (~ 100 GPa)	103–105

поры [10,11,13], что коррелирует с высокой пластичностью материала.

2. Материал и постановка экспериментов

Исходный материал марки ТВЧ содержал 99.9% тантала и имел средний размер зерна примерно $50\text{--}60\ \mu\text{m}$. Для получения субмикрокристаллической структуры образцы крупнозернистого тантала подвергались многократной всесторонней ковке при различных высокотемпературных режимах [3]. В результате интенсивной пластической деформации средний размер зерна уменьшился до $\sim 0.5\text{--}0.6\ \mu\text{m}$, причем зеренная структура после обработки была достаточно однородной.

Дефектность крупнозернистого и мелкозернистого материалов варьировалась путем воздействия ударной волной. В крупнозернистом материале электронномикроскопический анализ после ударно-волновой обработки выявил интенсивное двойникование; объемная доля двойников составляла 10–20% в зависимости от давления ударного сжатия. Поскольку высокоскоростное деформирование в ударной волне сопряжено с ростом температуры, остаточная плотность двойников после воздействия давлением 100 GPa в результате отжига оказалась несколько меньшей, чем после ударно-волновой обработки с давлением 40–60 GPa. В мелкозернистом материале после ударно-волновой обработки обнаруживаются лишь отдельные двойники толщиной $0.2\text{--}0.3\ \mu\text{m}$. Плотность дислокаций в крупнозернистом тантале в результате ударно-волнового воздействия возрастает от $0.5 \cdot 10^{10}$ до $2 \cdot 10^{10}\ \text{cm}^{-2}$ при росте давления ударного сжатия до 100 GPa.

В табл. 1 представлены данные о твердости всех типов образцов тантала, исследованных в настоящей работе. Отметим, что предварительное ударное сжатие увеличивает твердость только исходных крупнозернистых образцов, практически не изменяя ее в субмикрокристаллическом материале.

Эксперименты проводились с образцами толщиной $\sim 0.5\text{--}0.6$ и ~ 2 mm, которые вырезались из заготовок электроискровым способом. Поперечный размер

образцов составлял 25–30 mm. Ударно-волновое нагружение образцов осуществлялось ударом алюминиевой пластины толщиной 0.12 mm (для образцов толщиной 0.6 mm) или 0.4 mm. При таком соотношении толщин ударника и образца профиль импульса сжатия к моменту его выхода на свободную поверхность приобретает приблизительно треугольную форму, что уменьшает погрешность определения откольной прочности материала [23]. Эксперименты с разными толщинами образцов позволили изменять скорость деформирования тантала при растяжении в волне разгрузки перед разрушением примерно в 5 раз. Метание пластин-ударников со скоростью $\sim 1250 \pm 50$ m/s осуществлялось с помощью взрывного устройства [24]. При такой скорости удара давление ударного сжатия тантала составляет ~ 14 GPa, деформация в направлении одноосного сжатия $\varepsilon_x = 1 - V/V_0 = 0.075$. В экспериментах регистрировались профили скорости свободной поверхности с помощью лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [24,25].

3. Результаты измерений

На рис. 1 сопоставлены результаты измерений профилей скорости свободной поверхности $u_{\text{fs}}(t)$ образцов исходного (CG) и субмикрокристаллического (UFG) тантала.

На волновых профилях регистрируется выход на поверхность упругого предвестника, пластической ударной волны и части следующей за ней волны разрежения. Время нарастания параметров в пластической ударной волне определяется вязкостью материала или временем релаксации напряжений. При выбранном соотношении толщин ударника и образца условия нагружения вблизи свободной тыльной поверхности образца соответствуют началу затухания ударной волны под действием нагоняющей ее волны разрежения, разгрузка следует непосредственно за волной сжатия и уменьшает скорость частиц вещества. После отражения импульса сжатия от свободной поверхности внутри образца генерируются растягивающие напряжения, в результате чего инициируется его разрушение — откол. При этом происходит релаксация растягивающих напряжений и формируется волна сжатия (откольный импульс), выход которой

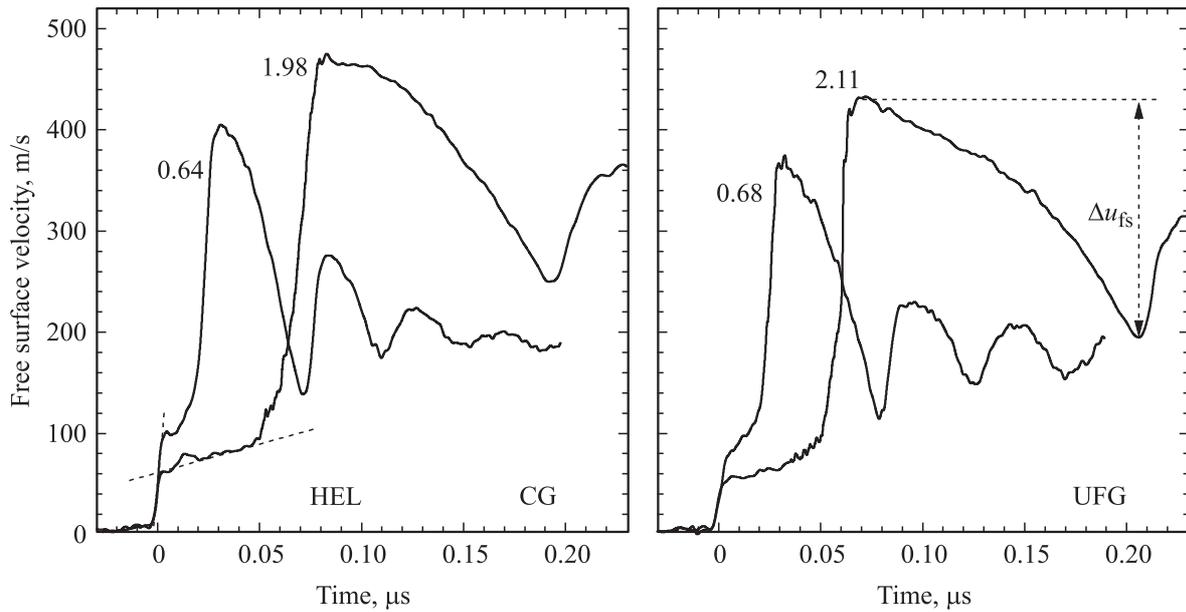


Рис. 1. Результаты измерений профилей скорости свободной поверхности образцов исходного (CG) и субмикроструктурного (UFG) тантала. Числа около профилей — толщины образцов (в мм).

на поверхность образца вызывает второй подъем ее скорости. Дальнейшие затухающие колебания скорости связаны с реверберацией откольного импульса в оторвавшейся от образца „откольной пластине“.

Напряжение сжатия за фронтом упругого предвестника — динамический предел упругости σ_{HEL} — рассчитывается по измеренной скорости свободной поверхности u_{HEL} как $\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{HEL} / 2$. Соответствующие значения предела текучести равны $Y = (3/2)\sigma_{HEL}(1 - c_b^2/c_l^2) = 2\sigma_{HEL}C/E'$, где $G = (3/4)\rho_0(c_l^2 - c_b^2)$ — модуль сдвига, $E' = \rho_0 c_l^2$ — модуль продольной упругости, c_l, c_b — продольная и объемная скорости звука, ρ_0 — плотность материала. При обработке волновых профилей, содержащих мелкие нерегулярные осцилляции и другие искажения, величина u_{HEL} определялась путем экстраполяции к фронту предвестника линейной аппроксимации части волнового профиля за фронтом предвестника, как это показано на рис. 1.

Декремент скорости поверхности Δu_{fs} при ее спаде от максимума до значения перед фронтом откольного импульса (рис. 1) пропорционален величине разрушающего напряжения — откольной прочности материала σ_{sp} в данных условиях нагружения. В линейном (акустическом) приближении

$$\sigma_{sp} = \frac{1}{2} \rho_0 c_b (\Delta u_{fs} + \delta u),$$

где δu — поправка на искажение волнового профиля вследствие различия скоростей фронта откольного импульса и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним [23]. Толщина откольной пластины h определяется по периоду Δt колебаний скорости поверхности после откола как $h = c_l \Delta t / 2$.

Таблица 2. Результаты измерений прочностных свойств тантала при ударно-волновом нагружении

Номер образца	h_{sam} , mm	h_{imp} , mm	σ_{HEL} , GPa	Y , GPa	σ_{sp} , GPa	h_{sp} , mm	\dot{V}/V_0 , 10^5 s^{-1}
Исходный тантал (CG)							
20	1.97	0.4	2.12	1.02	6.7	0.21	3.1
21	0.64	0.11	3.24	1.56	8.1	0.08	13
Субмикроструктурный тантал (UFG)							
9	2.14	0.41	2.05	0.99	7.1	0.26	4.5
10	2.11	0.41	1.83	0.88	7.6	0.26	4.8
11	0.68	0.12	2.66	1.28	7.9	0.09	12
12	0.54	0.12	2.2	1.06	8.4	0.07	19
Тантал CG после ударного сжатия 40 GPa							
18	1.97	0.41	1.6	0.77	6.5	0.24	3.7
19	0.56	0.11	1.97	0.95	7.6	0.08	12
Тантал UFG после ударного сжатия 40 GPa							
22	1.97	0.41	1.7	0.82	7.5	0.25	4.7
23	0.59	0.11	2.0	0.96	7.9	0.09	14
Тантал после ударного сжатия 100 GPa							
25(CG)	1.92	0.41	1.5	0.72	6.9	0.29	3
24(UFG)	1.97	0.41	—	—	7.4	0.25	3.9
Тантал CG при нагружении ударом со скоростью 4.1 km/s							
27	1.98	0.38	—	—	7.3	0.084	8.5
Монокристаллический тантал							
13	2.02	0.41	2.2	1.06	9.4	0.3	3.9
15	1.98	0.41	1.7	0.82	10.4	0.29	5
16	0.46	0.12	—	—	9.6	0.09	6

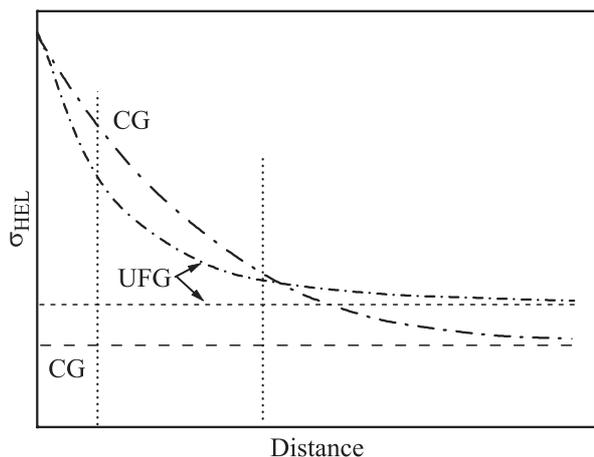


Рис. 2. Предполагаемое различие скоростей затухания упругих предвестников в крупнокристаллическом (CG) и субмикроструктурном (UFG) тантале. Вертикальными линиями отмечены толщины образцов в проведенных измерениях.

В табл. 2 представлены результаты измерений сопротивления высокоскоростному деформированию и разрушению тантала различной структуры в условиях ударно-волнового нагружения. В таблице использованы следующие обозначения: h_{sam} — толщина образца, h_{imp} — толщина ударника, σ_{HEL} — динамический предел упругости, Y — напряжение течения за фронтом упругого предвестника, σ_{sp} — откольная прочность, h_{sp} — толщина откольной пластины; \dot{V}/V_0 — скорость расширения вещества перед фронтом откольного импульса.

4. Напряжения течения тантала

Измерения демонстрируют существенное затухание упругих предвестников по мере распространения как в исходном, так и в субмикроструктурном тантале. Затухание вызвано релаксацией девиаторных напряжений вследствие развития пластической деформации непосредственно за упругой волной и связано со скоростью пластической деформации $\dot{\gamma}$ соотношением [26]

$$\left. \frac{d\sigma}{dh} \right|_{HEL} = -\frac{4}{3} \frac{G\dot{\gamma}_p}{c_l},$$

где h — пройденное волной расстояние. Представленные на рис. 1 данные свидетельствуют о падении величины σ_{HEL} в крупнозернистом материале от 3.24 GPa на расстоянии 0.64 mm до 2.12 GPa на расстоянии 1.98 mm. В субмикроструктурном тантале величина σ_{HEL} изменяется от 2.66 GPa на расстоянии 0.68 mm до 1.83 GPa на расстоянии 2.11 mm. В то время как твердость тантала в результате интенсивной пластической деформации возросла примерно на 25% (табл. 1), величина динамического предела упругости σ_{HEL} оказалась даже несколько меньшей, чем для исходного крупнозернистого материала. Особенно наглядно это различие проявляется в опытах с образцами толщиной ~ 0.65 mm.

Время нарастания параметров в пластической ударной волне для субмикроструктурных образцов заметно меньше, что указывает на более высокую скорость пластической деформации и, вероятно, на меньшую характерную вязкость $\tau/\dot{\epsilon}$ материала. Уменьшение вязкости после интенсивной пластической деформации ранее

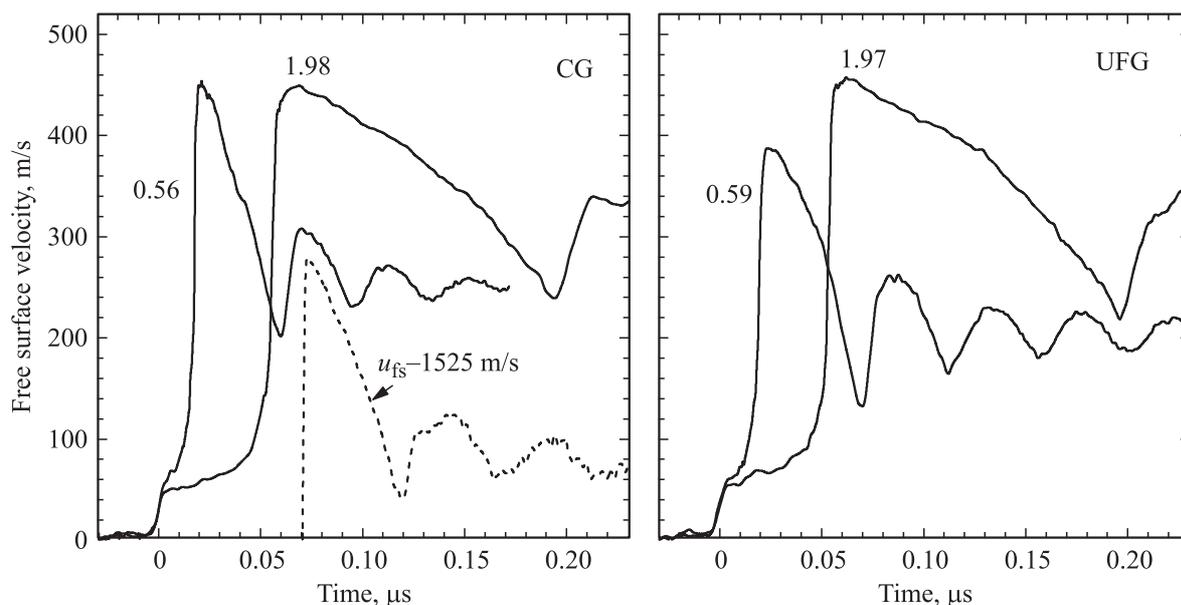


Рис. 3. Результаты измерений профилей скорости свободной поверхности образцов исходного (CG) и субмикроструктурного (UFG) тантала, предварительно подвергнутых ударному сжатию с давлением 40 GPa. Числа около профилей — толщины образцов (в mm). Пунктиром показан профиль $u_{fs}(t)$, измеренный для CG-образца тантала при ударе со скоростью 4.1 km/s. Профиль смещен на 1525 m/s (кратно постоянной VISAR) в сторону меньших значений скорости.

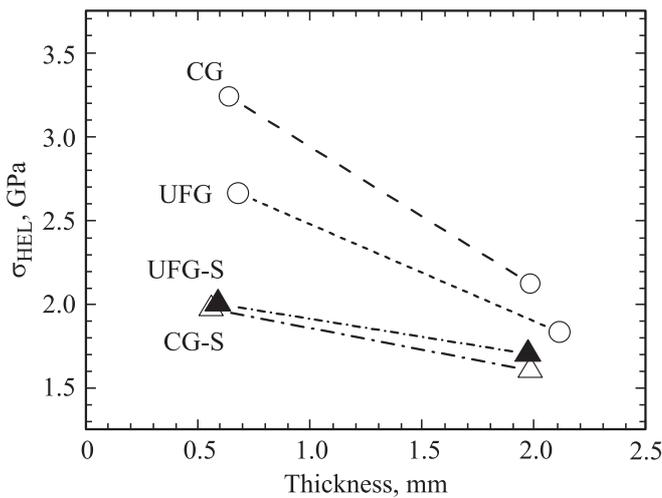


Рис. 4. Затухание упругих предвестников в образцах тантала в исходном (CG) и субмикроструктурном (UFG) состояниях и после ударно-волнового воздействия с давлением ударного сжатия 40 GPa (CG-S и UFG-S соответственно).

наблюдалось и для других металлов [7]. Максимальная скорость сжатия в ударной волне $\dot{\epsilon}_{\max} = \dot{u}_{fs,\max}/2U_S$ в соответствии с измеренными значениями максимального ускорения поверхности $\dot{u}_{fs,\max}$, составившими $26 \text{ (km/s)} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ для CG-тантала и $47 \text{ (km/s)} \cdot \mu\text{s}^{-1}$ для UFG-тантала при скорости пластической ударной волны 3.7 km/s , оценена как $3.5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ для крупнозернистого тантала и $6.4 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$ для субмикроструктурного.

Вероятно, наблюдаемое различие проявления эффектов измельчения зеренной структуры в обычных условиях низкоскоростной деформации и при высокоскоростном ударно-волновом сжатии объясняется разной скоростью релаксации напряжений в крупнозернистом и мелкозернистом материалах и разной скоростью затухания предвестников, как это схематически показано на рис. 2. На больших расстояниях напряжения за упругими предвестниками должны приблизиться к значениям, соответствующим квазистатическим пределам текучести. Иными словами, величина σ_{HEL} , измеренная на образцах большой толщины, для субмикроструктурного тантала должна быть большей, чем для крупнозернистого. Однако если характерная вязкость более твердого UFG-тантала меньше вязкости CG-материала, то и затухание упругого предвестника в UFG-материале происходит быстрее, чем в CG-тантале. В результате для образцов малой толщины возможна реализация ситуации, соответствующей области между вертикальными линиями на рис. 2, в которой более твердый UFG-тантал демонстрирует меньшие значения динамического предела упругости, чем крупнозернистый материал.

На рис. 3 представлены результаты опытов с образцами исходного и субмикроструктурного тантала, подвергнутыми ударно-волновому воздействию с давлением ударного сжатия 40 GPa, а на рис. 4 суммированы все

результаты измерений динамического предела упругости в зависимости от толщины образцов.

После ударно-волновой обработки уменьшились как сами значения динамического предела упругости CG- и UFG-материалов, так и различие между ними. Уменьшились и скорости затухания упругих предвестников в исследованном диапазоне толщин образцов. При этом скорость сжатия в пластической ударной волне после ударно-волновой обработки возросла до $(0.95-1.1) \cdot 10^7 \text{ s}^{-1}$ и мало различается для двух типов материала. Увеличение давления предварительного ударного сжатия до 100 GPa привело к дисперсии фронта упругого предвестника без существенного изменения остальных измеряемых характеристик.

5. Откольная прочность тантала

Измерения откольной прочности тантала различной зеренной структуры были дополнены экспериментами с монокристаллическим танталом. Ориентация монокристаллов относительно направления распространения ударной нагрузки не определялась. В аналогичных опытах с молибденом [27] было найдено, что влияние ориентации на сопротивление откольному разрушению невелико. На рис. 5 представлены волновые профили, полученные в опытах для монокристаллического тантала. Непосредственно из сопоставления данных рис. 1, 3 и 5 видно, что свободные от структурных дефектов монокристаллы демонстрируют значительно более высокое сопротивление откольному разрушению, чем поликристаллический тантал. При этом, судя по форме волновых профилей непосредственно перед откольным импульсом, прочностной ресурс материала в этих опытах реализован не полностью и, вероятно, более высокие значения откольной прочности могли бы регистрироваться при большем пиковом давлении ударного сжатия.

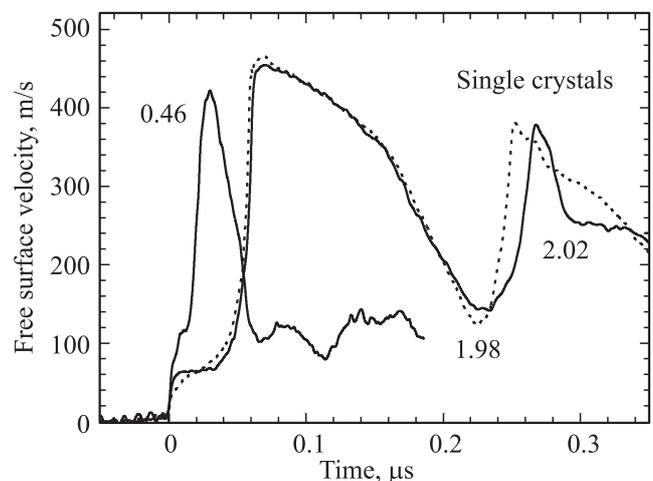


Рис. 5. Результаты измерений профилей скорости свободной поверхности образцов монокристаллического тантала. Числа около профилей — толщины образцов (в mm).

Поскольку в литературе сообщается о зависимости сопротивления откольному разрушению от пикового давления в падающем импульсе нагрузки, нами дополнительно проведено измерение откольной прочности образца исходного тантала толщиной 1.98 mm при нагружении ударом алюминиевой пластины толщиной 0.38 mm со скоростью 4.1 km/s. При такой скорости удара давление ударного сжатия тантала составляло ~ 70 GPa против ~ 14 GPa в основной серии опытов. Измеренный в этом случае профиль скорости свободной поверхности представлен на рис. 3.

Высокоскоростное разрушение при отколе представляет собой кинетический процесс зарождения, роста и слияния многочисленных несплошностей [28], а реализуемые значения сопротивления разрушению являются результатом конкуренции роста растягивающих напряжений в процессе волновых взаимодействий и их релаксации в результате появления и роста несплошностей в материале. По этой причине измеряемая величина сопротивления разрушению при отколе возрастает с увеличением скорости деформирования.

Результаты измерений откольной прочности тантала суммированы в табл. 2 и на рис. 6, где они представлены в виде зависимости от скорости расширения вещества в волне разрежения, определяемой как

$$\frac{\dot{V}}{V_0} = -\frac{\dot{u}_{\text{fsr}}}{2c_b},$$

где \dot{u}_{fsr} — измеренная скорость спада скорости свободной поверхности исследуемого образца в разгрузочной части импульса ударного сжатия. Показано [24,27,29], что начальная скорость роста относительного объема несплошностей при отколе с точностью до постоянного множителя $\sim (2-4)$ равна вычисленной таким образом скорости расширения вещества в волне разгрузки.

Из представленных результатов видно, что уменьшение размера зерна привело к возрастанию примерно на 5% откольной прочности тантала. Эффект несколько сильнее выражен при большей длительности импульса ударного сжатия. Этот результат не столь очевиден, как можно было бы ожидать, основываясь на сведениях о поведении материалов в обычных условиях. В поликристаллическом тантале зародышевые трещины или поры при отколе образуются на границах зерен. По этой причине монокристаллы характеризуются более высоким сопротивлением откольному разрушению, чем поликристаллический тантал. Вероятно, измельчение зерен интенсивной пластической деформацией сопровождается также измельчением включений и других потенциальных очагов разрушения, сконцентрированных на границах зерен.

Предварительная обработка тантала ударным сжатием практически не повлияла на величину разрушающих напряжений при отколе или незначительно уменьшила σ_{sp} . Аналогичный эффект имело почти пятикратное увеличение давления ударного сжатия при измерении

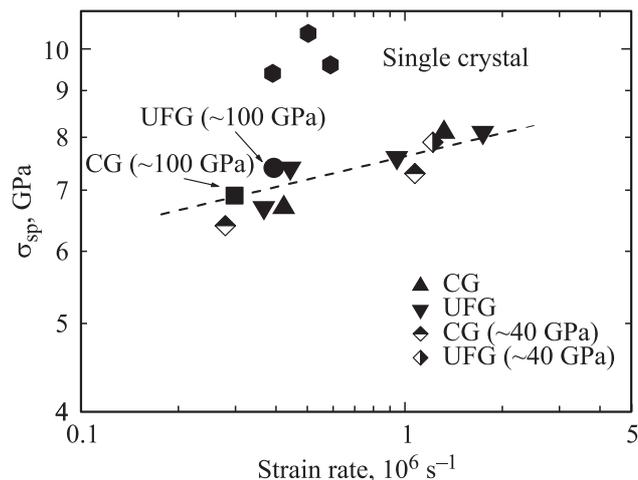


Рис. 6. Результаты измерений динамической прочности тантала в различных структурных состояниях.

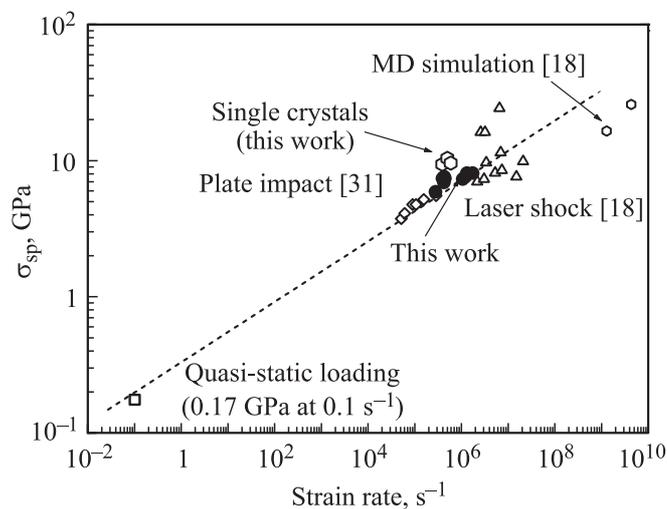


Рис. 7. Зависимость откольной прочности тантала от скорости деформирования по данным разных авторов.

откольной прочности. Вероятно, двойники и дислокации, генерируемые ударной волной, могут вносить лишь малый вклад в зарождение разрушений, по крайней мере в исследованном диапазоне скоростей деформирования. Что касается сообщений о росте откольной прочности при увеличении пикового давления в падающем импульсе нагрузки, то, по всей вероятности, этот эффект является кажущимся и вызван погрешностями в организации измерений. Подробное обсуждение этого аспекта можно найти в работе [30].

На рис. 7 представлены результаты настоящей работы вместе с результатами измерений откольной прочности тантала, полученными французскими авторами [18,31]. Видно, что в случае инициирования откола с помощью импульсного лазера разброс данных по прочности при одной и той же скорости деформирования может достигать до 50% и более. При плоском соударении

пластин, когда скорость деформирования перед разрушением варьируется в диапазоне $5 \cdot 10^4 - 5 \cdot 10^6 \text{ s}^{-1}$, такого сильного разброса измеренной откольной прочности даже для тантала с различной зеренной структурой не наблюдается. Вероятно, нестабильность данных по откольной прочности появляется, когда толщина откола становится меньше размера зерна. Наши результаты в целом хорошо согласуются с данными других авторов, а общая зависимость разумно экстраполируется к значению прочности тантала при низкоскоростном деформировании.

6. Заключение

Получены новые данные о прочностных свойствах технически чистого тантала марки ТВЧ в условиях ударно-волнового нагружения в субмикросекундном диапазоне длительностей нагрузки. Наиболее интересным и неожиданным оказалось то, что уменьшение размера зерна от 60 до $0.5 \mu\text{m}$ путем интенсивной пластической деформации, которое привело к возрастанию твердости материала примерно на 25%, оказало обратный эффект на величину динамического предела упругости. Эффект объяснен более высокой скоростью релаксации напряжений в мелкозернистом материале. Ускоренная релаксация напряжений в мелкозернистом материале проявляется также в более высокой скорости сжатия в пластической ударной волне. По-видимому, границы зерен являются в этих условиях местами зарождения дислокаций, обеспечивающих более высокую скорость деформирования в мелкозернистом материале.

Упрочнение тантала воздействием ударной волны с давлением 40–100 ГПа привело к росту скорости релаксации напряжений, падению динамического предела текучести и исчезновению различия его значений для крупнозернистого и мелкозернистого материала.

Откольная прочность тантала возрастает примерно на 5% с уменьшением размера зерна и не изменяется после ударно-волнового воздействия. Пятикратное увеличение давления ударного сжатия, предшествующего отколу, также не привело к заметному изменению величины разрушающего напряжения. По-видимому, двойники и дислокации, генерируемые ударной волной, могут вносить лишь малый вклад в зарождение разрушений, по крайней мере в исследованном диапазоне скоростей деформирования. Измеренные значения откольной прочности согласуются с литературными данными. Максимальные разрушающие напряжения реализованы в монокристаллах тантала.

Авторы выражают глубокую признательность В.А. Салищеву за помощь в подготовке субмикроструктурных танталовых образцов и их металлографические исследования, а также Л.Г. Ермолову за помощь в подготовке и проведении взрывных экспериментов.

Список литературы

- [1] М.А. Мейерса, Л.Е. Мурра. Ударные волны и явления высокоскоростной деформации металлов / Под ред. Г.П. Эпштейна. Металлургия, М. (1984). 512 с.
- [2] Р.З. Валиев, И.В. Александров. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. Логос, М. (2000). 272 с.
- [3] Р.З. Валиев, И.В. Александров. Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. Академкнига, М. (2007). 398 с.
- [4] Ю.Р. Колобов, Р.З. Валиев. Зернограничная диффузия и свойства наноструктурных материалов. Наука, Новосибирск. (2001). 232 с.
- [5] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, В.Е. Фортов. Изв. РАН. МТТ 4, 86 (2005).
- [6] С.В. Разоренов, А.С. Савиных, Е.Б. Зарецкий, Г.И. Канель, Ю.Р. Колобов. ФТТ 47, 4, 639 (2005).
- [7] Г.В. Гаркушин, О.Н. Игнатова, Г.И. Канель, Л. Мейер, С.В. Разоренов. Изв. РАН. МТТ 4, 155 (2010).
- [8] С.В. Разоренов, Г.В. Гаркушин, Г.И. Канель, О.А. Кашин, И.В. Рагочка. ФТТ 53, 4, 768 (2011).
- [9] P.P. Gillis, K.G. Hoge R.J. Wasley. J. Appl. Phys. 42, 2145 (1971).
- [10] T.A. Manson, B.L. Henrie, K.A. Thomas. In: Shock compression in condensed matter-2005/Eds M.D. Furnish, M.L. Elert, T.P. Russell, C.T. White. AIP Conf. Proc. (2006). P. 638.
- [11] D.L. Tonks, B.L. Henrie, C.P. Trujillo, D. Holtkamp, W.R. Thissell. In: Shock compression in condensed matter-2005/Eds M.D. Furnish, M.L. Elert, T.P. Russell, C.T. White, AIP Conf. Proc. (2006). P. 670.
- [12] J.F. Bingert, B.L. Henrie, D.L. Worthington. Met. Mater. Trans. A 38, 1712 (2007).
- [13] F. Llorca, G. Roy. In: Shock compression in condensed matter-2003/Eds M.D. Furnish, Y.M. Gupta, J.W. Forbes. AIP Conf. Proc. (2004). P. 589.
- [14] W.R. Thissell, A.K. Zurek, D.L. Tonks, R.S. Hixson. In: Shock compression in condensed matter-1999/Eds M.L. Elert, W.T. Buttler, M.D. Furnish, W.W. Anderson, W.G. Proud. AIP Conf. Proc. (2000). P. 451.
- [15] L.C. Chhabildas, W.M. Trott, W.D. Reinhart, J.R. Cogar, G.A. Mann. In: Shock compression in condensed matter-2001/Eds M.D. Furnish, N.N. Thadhani, Y. Horie. AIP Conf. Proc. (2002). P. 483.
- [16] M.D. Furnish, G.T. Gray III, J.F. Bingert. In: Shock compression in condensed matter-2009/Eds M.L. Elert, W.T. Buttler, M.D. Furnish, W.W. Anderson, W.G. Proud. AIP Conf. Proc. (2009). P. 1089.
- [17] M.D. Furnish, W.D. Reinhart, W.M. Trott, L.C. Chhabildas, T.J. Vogler. In: Shock compression in condensed matter-2005/Eds M.D. Furnish, M.L. Elert, T.P. Russell, C.T. White, AIP Conf. Proc. (2006). P. 615.
- [18] J.P. Cuq-Lelandias, M. Boustie, L. Soulard, L. Berthe, T. De Resseguier, P. Combis, J. Bontaz-Carion, E. Lescoute. RPJ Web Conf. 10, 00014 (2010).
- [19] D.B. Holtkamp, D.A. Clark, E.N. Ferm, R.A. Gallegos, D. Hammon, W.F. Hamsing. In: Shock compression of condensed matter-2003/Eds M.D. Furnish, N.N. Thadhani, Y. Horie. AIP Conf. Proc. (2004). P. 739.
- [20] J.R. Asay, T. Ao, T.J. Vogler, J.-P. Davis, G.T. Gray III. J. Appl. Phys. 106, 073 515 (2009).

- [21] L.E. Murr, M.A. Meyers, C.S. Niou, Y.J. Chen, S. Parru, C. Kennedy. *Acta Mater.* **45**, 1, 157 (1997).
- [22] J.M. McNaney, L.M. Hsung, N.R. Barton, M. Kumar. In: *Shock compression in condensed matter-2009*/Eds M.L. Elert, W.T. Buttler, M.D. Furnish, W.W. Anderson, W.G. Proud. AIP Conf. Proc. (2009). P. 1127.
- [23] Г.И. Канель. *ПМТФ* **42**, 2, 194 (2001).
- [24] Г.И. Канель, С.В. Разоренов, А.В. Уткин, В.Е. Фортов. *Ударно-волновые явления в конденсированных средах. Янус-К, М.* (1996) 408 с.
- [25] L.M. Barker, R.E. Hollenbach. *J. Appl. Phys.* **43**, 4669 (1972).
- [26] G.E. Duvall. In: *Stress waves in anelastic solids*/Eds H. Kolsky W. Prager. Springer-Verlag, Berlin (1964). P. 20.
- [27] G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin, V.E. Fortov, K. Baumung, H.U. Karow, D. Rush, V. Licht. *J. Appl. Phys.* **74**, 12, 7162 (1993).
- [28] T. Antoun, L. Seaman, D.R. Curran, G.I. Kanel, S.V. Razorenov, A.V. Utkin. *Spall fracture*. Springer, N.Y. (2003). 404 p.
- [29] А.В. Уткин. *ПМТФ* **38**, 6, 157 (1997).
- [30] G.I. Kanel. *Int. J. Fract.* **163**, 1–2, 173 (2010).
- [31] G. Roy. Thesis of doctor of sciences. University of Poitiers (2003).