

05;12

Влияние структурных факторов на субмикросекундную прочность алюминиевого сплава D16T

© Г.В. Гаркушин,¹ С.В. Разоренов,¹ Г.И. Канель²¹ Институт проблем химической физики РАН,
134432 Черноголовка, Московская область, Россия² Объединенный институт высоких температур РАН,
125412 Москва, Россия
e-mail: garkushin@icp.ac.ru

(Поступило в Редакцию 11 декабря 2007 г. В окончательной редакции 24 марта 2008 г.)

Представлены результаты измерений динамических пределов текучести и прочности алюминиевого сплава D16T в условиях нагружения испытываемых образцов плоскими ударными волнами субмикросекундной длительности. Эксперименты проведены с исходным (термообработанным) и отожженным материалом, а также с образцами сплава, подвергнутыми всестороннему прессованию при повышенных температурах. Варьировались направление нагрузки относительно текстуры материала, длительность и форма импульса ударного сжатия. Найдено, что различие в сопротивлении разрушению при отколе в направлении прокатки и в поперечном направлении близко к величине динамического предела текучести материала.

PACS: 62.20.-x, 62.50.+p

Введение

Исследования механических свойств материалов при скорости деформирования свыше 10^4 s^{-1} проводятся методом ударно-волнового нагружения испытываемых образцов [1,2]. При этом сведения о сопротивлении высокоскоростному деформированию в микросекундном диапазоне длительностей нагрузки получают непосредственно по результатам измерений структуры интенсивных волн сжатия в материале, а информацию о его прочности — из анализа откольных явлений при отражении импульса ударного сжатия от свободной поверхности образца [3]. К настоящему времени получены сведения о прочностных свойствах широкого круга технических металлов и сплавов, металлических монокристаллов в микросекундном и наносекундном диапазонах длительностей воздействия.

В исследованиях последних лет (см., например, [4–8]) все большее внимание уделяется изучению деталей механизма высокоскоростного разрушения и их связи со структурой материала с тем, чтобы найти новые области применения техники ударных волн для решения задач материаловедения, физики прочности и пластичности. При этом все более важными становятся методические аспекты измерений. Недостаточно детальный анализ откольных явлений в различных условиях испытания приводит зачастую к существенному количественному расхождению данных, полученных разными авторами.

Высокоскоростное разрушение при отколе представляет собой кинетический процесс зарождения, роста и слияния многочисленных несплошностей. По этой причине реализуемые значения сопротивления разрушению возрастают с увеличением скорости приложения нагрузки. Измеряемые величины разрушающих напряжений при отколе представляют собой результат конкуренции

роста растягивающих напряжений в процессе волновых взаимодействий и их релаксации в результате появления и роста несплошностей в материале. Вследствие кинетического характера процесса разрушения его развитие в значительной мере определяется историей нагружения; при этом максимальные значения растягивающих напряжений, реализуемые при отколе (называемые откольной прочностью материала σ_{sp}) зависят как от общей длительности импульса ударной нагрузки, так и от его формы.

В случае отражения от поверхности импульса сжатия с треугольным профилем давления растягивающие напряжения проявляются сначала в непосредственной близости от свободной поверхности, их величина монотонно возрастает по мере распространения отраженной волны в глубь образца. При этом в каждом выделенном сечении нарастание растягивающего напряжения происходит быстро, после чего в течение некоторого времени напряжение поддерживается постоянным. В этом случае достаточно приемлемым является допущение, что разрушение развивается после достижения максимального растяжения. Интуитивно ясно, что на динамику волновых взаимодействий заметное влияние могут оказывать процессы, сопровождающиеся достаточно быстрой релаксацией напряжений. Акустический анализ динамики волновых взаимодействий при отражении импульса сжатия от свободной поверхности разрушаемого тела [9] показывает, что регистрируемые значения разрушающих напряжений при отколе соответствуют скорости роста объема несплошностей, примерно равной скорости расширения вещества в разгрузочной части падающего импульса.

В практике измерений откольной прочности материалов часто используется генерация импульсов сжатия ударом пластины, толщина которой равна половине тол-

шины испытуемого образца, с тем, чтобы откольное разрушение происходило близко к середине образца. В этом случае область растяжения сначала образуется вблизи среднего сечения образца, после чего распространяется к поверхности соударения и к тыльной поверхности образца. При этом характер волновых взаимодействий таков, что нарастание растягивающего напряжения происходит медленнее, чем в первом случае. При меньшей скорости приложения нагрузки заметное разрушение может развиваться уже в процессе возрастания растягивающих напряжений.

Второй и, вероятно, более существенной причиной расхождения данных по откольной прочности твердых тел является искажение регистрируемого волнового профиля вследствие различия скоростей фронта откольного импульса и пластической части падающей волны нагрузки перед ним [3,10]. Эти искажения минимальны в случае треугольного профиля импульса ударной нагрузки и достигают весьма значительных величин при соотношении толщин ударника и образца 1/2. При достаточно малом отношении толщины ударника и мишени вблизи тыльной поверхности мишени импульс ударного сжатия принимает форму, близкую к треугольной, вследствие чего вблизи поверхности реализуются истории нагружения, подобные обсуждавшимся для треугольного импульса.

В настоящей работе представлены результаты ударно-волновых экспериментов с алюминиевым сплавом D16T, в ходе которых варьировались форма и длительность импульсов ударного сжатия, направление ударной нагрузки относительно направления прокатки материала, а также структурного состояния последнего.

Методика

Образцы для ударно-волновых испытаний вырезались из прутка алюминиевого сплава D16T диаметром 60 мм и имели толщину от 2 до 5 мм. Сплав имеет плотность $\rho_0 = 2790 \text{ g/m}^3$, продольная скорость звука в нем $c_l = 6350 \text{ m/s}$, измеренная твердость, по Викерсу, составляет 110 kg/mm^2 . Основная часть экспериментов проведена с образцами, вырезанными таким образом, что их плоскость была перпендикулярна направлению прокатки, а ударно-волновое нагружение осуществлялось соответственно в направлении, параллельном направлению прокатки. Микроструктура образцов сплава в плоскости, перпендикулярной направлению прокатки, представлена равноосными зернами, размер которых варьируется от 1 до 20 μm . Часть этих образцов была подвержена отжигу при температуре 450°C в течение 2 h с последующим медленным охлаждением. После отжига размер зерна увеличился главным образом, за счет исчезновения мелкой фракции (зерен размером менее 10 μm не наблюдается), твердость сплава уменьшилась до 56 kg/mm^2 , а продольная скорость звука — возросла до 6460 m/s. Кроме того, испытывались неотожженные образцы сплава,

вырезанные из той же заготовки таким образом, что их плоскость была параллельна направлению прокатки, а ударно-волновое нагружение осуществлялось в направлении, перпендикулярном направлению прокатки.

Для получения субмикроструктурной структуры в сплаве использовался метод многократного всестороннего прессования в интервале температур 450–200°C. Каждый цикл, при заданной температуре, включал в себя трех- или четырехкратное сжатие заготовки со сменой оси деформации. В образцах после всестороннего прессования формировались преимущественно неравноосные зерна с поперечным размером 0.2–0.8 μm . Твердость сплава после обработки всесторонним прессованием составила 85 kg/mm^2 .

Экспериментальная часть

Плоские ударные волны в образцах сплава генерировались алюминиевыми пластинами-ударниками толщиной от 0.4 до 2 мм, имеющими скорость $630 \pm 30 \text{ m/s}$. Метание ударников осуществлялось с применением взрывных устройств [1]. Испытания проводились на воздухе. В экспериментах осуществлялась непрерывная регистрация движения свободной тыльной поверхности образца с применением лазерного доплеровского измерителя скорости VISAR [1,11]. Профили скорости свободной поверхности $u_{fs}(t)$ фиксировались с разрешением 1 ns по времени и $\pm 3 \text{ m/s}$ по измеряемой скорости.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 приведены результаты измерений профилей скорости свободной поверхности образцов сплава при ударно-волновом нагружении в направлении прокатки и в поперечном направлении. На волновых профилях регистрируется выход на поверхность упруго-пластической волны сжатия и части следующей за ней волны разрежения. Слабая волна сжатия перед фронтом упругого предвестника (отмечена как AS на рис. 1) есть результат воздействия воздушной ударной волны перед летящим ударником. Время нарастания параметров в пластической ударной волне определяется вязкостью материала или временем релаксации напряжений. При выбранном соотношении толщины ударника и образца условия нагружения вблизи свободной тыльной поверхности образца соответствуют началу затухания ударной волны под действием нагоняющей ее волны разрежения. 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 на поверхность образца обычно вызывает второй подъем ее скорости или, как в одном из представленных экспериментов, замедляет темп ее падения в разгрузочной части падающего импульса сжатия.

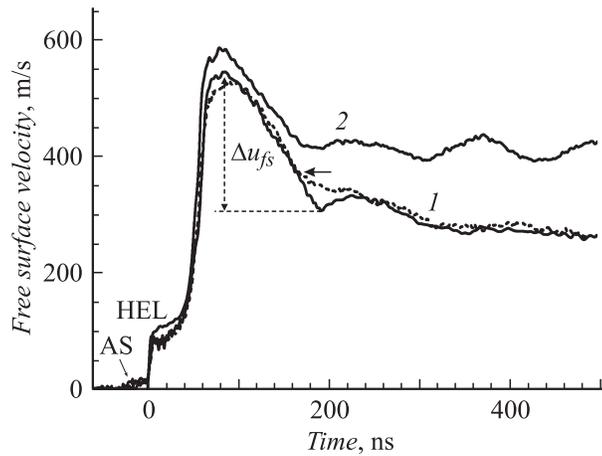


Рис. 1. Профили скорости свободной поверхности образцов сплава D16T толщиной 2 mm в исходном состоянии при нагружении ударом пластины толщиной 0.4 mm; условия нагружения в направлении прокатки (1) и в поперечном направлении (2). HEL — упругий предвестник волны сжатия. AS — результат воздействия воздушной ударной волны перед пластиной-ударником. Показан декремент скорости свободной поверхности Δu_{fs} , используемый при определении величины откольной прочности. Стрелкой на профиле без явно выраженного откольного импульса отмечено предполагаемое начало разрушения.

Напряжение одноосного сжатия за фронтом упругого предвестника $\sigma_{HEL} = \rho_0 c_l u_{fs}^{HEL} / 2$ (динамический предел упругости материала) связано с пределом текучести σ_T соотношением

$$\sigma_T = \frac{3}{2} \sigma_{HEL} (1 - c_b^2 / c_l^2), \quad (1)$$

где c_l, c_b — продольная и объемная скорости звука соответственно, b_{fs}^{HEL} — величина скорости свободной поверхности за фронтом упругого предвестника. Непосредственно из рисунка видно, что воспроизводимость амплитуды и формы упругого предвестника, распространяющегося в направлении прокатки, достаточно хороша, а при нагружении в поперечном направлении материал демонстрирует несколько большее значение динамического предела упругости.

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

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

где δu — поправка на искажение профиля скорости вследствие различия скоростей фронта откольного импульса и скорости пластической части падающей волны разгрузки перед ним [3,10]. Подобные искажения имеют место, когда релаксация напряжений при разрушении порождает в растянутом материале волну сжатия, фронт

которой представляет собой упругую волну и нагоняет разгрузочную часть падающего импульса сжатия, движущуюся с объемной скоростью звука (c_b).

Из представленных на рис. 1 профилей скорости свободной поверхности видно, что откольное разрушение сплава при нагружении в направлении прокатки имеет затянувшийся характер: в течение длительного времени после начала разрушения откалывающийся поверхностный слой остается связанным с остальной частью образца и вследствие этого продолжает тормозиться. Отметим, что подобный характер разрушения ранее наблюдался, в частности, в опытах со сталью 09G2S [7], нагружаемой, как и в нашем случае, в направлении прокатки. Максимальное сопротивление откольному разрушению, определяемое по величине Δu_{fs} , соответствует начальной стадии разрушения [1]. Завершение разрушения сопряжено с работой роста и слияния зародившихся несплошностей, на что расходуется кинетическая энергия откалывающейся пластины. Разность кинетических энергий откалывающегося слоя непосредственно перед разрушением и после его завершения определяется работой разрушения [12].

Сопоставление двух волновых профилей, полученных в одинаковых условиях нагружения (рис. 1), показывает, что регистрируемое сопротивление разрушению при ударном сжатии в продольном направлении варьируется от опыта к опыту. Вариации значений откольной прочности наблюдались и ранее [13,14] и объясняются они, очевидно, неоднородностью структуры материала. Подобные эффекты можно наблюдать, если пространственное разрешение измерений достаточно для регистрации поперечных неоднородностей поля скоростей. Измеренные значения скорости усреднены по пятну диаметром примерно 0.1 mm, в которое фокусировалось лазерное излучение прибора VISAR. Кроме того, эффекты неомогенности разрушения сглаживаются по мере распространения сигнала от плоскости откола к свободной поверхности образца. Толщина откола в этих опытах составила 0.35 mm, следовательно, можно говорить о характерном размере неоднородности структуры материала, большем или примерно равном 0.1–0.3 mm. Начиная с момента времени 250 ns после выхода фронта волны на свободную поверхность результаты двух обсуждаемых опытов практически совпадают.

Непосредственное сопоставление волновых профилей на рис. 1, полученных в условиях нагружения в направлении прокатки и в поперечном направлении демонстрирует явно меньшее сопротивление откольному разрушению в последнем случае. В этом отношении поведение дюралюминия D16T подобно ранее наблюдавшемуся для текстурированных сталей и сплавов [7,15–17]. При поперечной ориентации ударной нагрузки разрушение быстрее завершается, практически не наблюдается торможение откольной пластины, а величина работы разрушения существенно меньше, чем при нагружении в направлении прокатки.

На рис. 2 представлены результаты опытов с образцами отожженного материала (удар в направлении прокат-

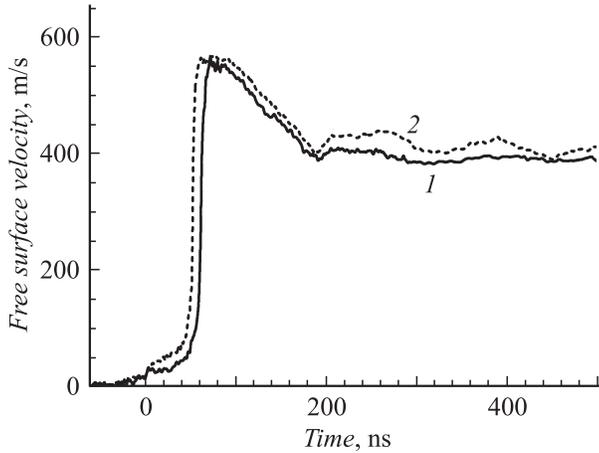


Рис. 2. Результаты измерений профилей скорости свободной поверхности образца отожженного материала (1) и материала, подвергнутого всестороннему прессованию (2). Толщина образцов 2 mm, нагружение ударом алюминиевой пластины толщиной 0.4 mm со скоростью 630 ± 30 m/s.

ки) и материала, подвергнутого после отжига всестороннему прессованию. Отожженный материал имеет вдвое меньший динамический предел упругости, чем исходный, что приблизительно соответствует соотношению значений твердости. Крутизна пластической волны, характеризующая скорость сжатия, в отожженном материале в 4–5 раз выше, чем в исходном, что свидетельствует о меньшей вязкости или меньшем времени релаксации девиаторных напряжений. Торможение откальзывающейся пластины коррелирует с пределом текучести материала: для отожженного сплава эффект значительно меньше. Измельчение зеренной структуры в результате обработки всесторонним прессованием привело к возрастанию динамического предела упругости отожженного материала, но практически не повлияло на величину откольной прочности.

На рис. 3 приведены результаты опытов с образцами толщиной 4–5 mm при отношении толщины ударника и образца, равном 1/2 и 1/5 и сумме значений их толщины, равной 6 mm. Увеличение общей длительности импульса ударной нагрузки привело к тому, что разрушение завершается в течение времени первой реверберации волн в откальзывающейся пластине: в отличие от рис. 1 затянутое торможение откольной пластины в этих опытах не наблюдается. Как и следовало ожидать, измерения демонстрируют возрастание декремента скорости перед откольным импульсом Δu_{fs} с приближением зоны разрушения к поверхности образца. В опыте с толстым ударником перед откольным импульсом регистрируется пологий минимум скорости. Период осцилляций скорости поверхности после откола ($0.70 \pm 0.02 \mu s$) мало отличается от длительности падающего импульса сжатия ($0.72 \pm 0.02 \mu s$ на соответствующем уровне скорости). Едва ли в данном случае причиной различия значений Δu_{fs} в опытах 1 и 3 на рис. 3 является только искажение волнового профиля на

пути от плоскости откола к свободной поверхности из-за различия скоростей распространения падающей волны и откольного импульса. Вероятно, в опыте с толстым ударником значительный вклад дает также инициирование разрушения непосредственно во время нарастания растягивающих напряжений в глубине образца.

Как и в опытах с тонкими образцами, отожженный материал демонстрирует меньшее сопротивление откольному разрушению. С увеличением толщины откола возрастает сглаживание возмущений из зоны разрушения, измерения принимают не столь локальный характер, а разброс получаемых значений Δu_{fs} уменьшается.

На рис. 4 показаны профили скорости свободной поверхности образцов сплава D16T толщиной 5 mm при

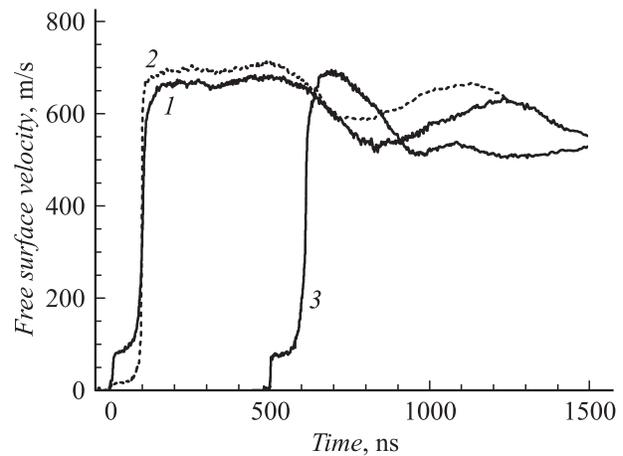


Рис. 3. Профили скорости свободной поверхности образцов сплава D16T толщиной 4 mm в исходном (1) и отожженном (2) состояниях при ударе алюминиевой пластиной толщиной 2 mm и образца толщиной 5 mm, нагружаемого ударом пластины толщиной 1 mm (3). Нагрузка ориентирована параллельно направлению прокатки. Кривая 3 сдвинута на $t = 500$ ns, для наглядного рассмотрения особенностей каждого профиля.

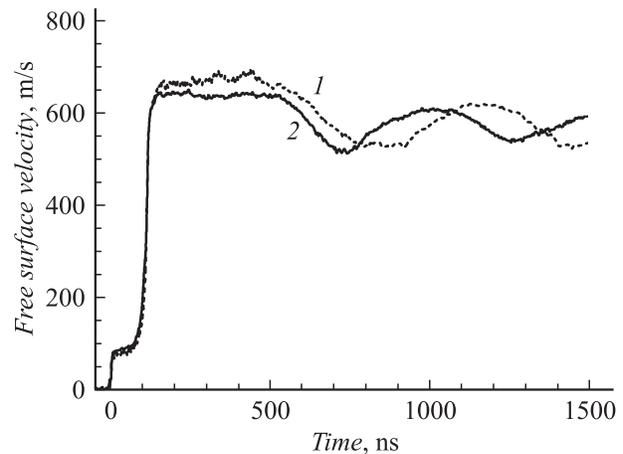


Рис. 4. Профили скорости свободной поверхности образцов сплава D16T толщиной 5 mm при ударном нагружении параллельно (1) и перпендикулярно (2) направлению прокатки. Удар алюминиевой пластиной толщиной 2 mm.

Результаты измерений динамического предела упругости и откольной прочности сплава D16T в различных структурных состояниях

Состояние материала, толщина образца, mm	Толщина ударника, mm, направление удара	$\sigma_{\text{нел.}}$, GPa	σ_{γ} , GPa	$\sigma_{\text{сп.}}$, GPa	$\delta_{\text{сп.}}$, mm	\dot{V}/V_0 , s ⁻¹
Исходный, 2	0.4,	0.73	0.315	1.7	0.37	$2.4 \cdot 10^5$
Исходный, 2	0.4,	0.7	0.3	1.25	0.29	$2.4 \cdot 10^5$
Исходный, 4	0.76,	0.66	0.29	1.39	0.6	$1.2 \cdot 10^5$
Исходный, 4	2,	0.69	0.30	1.19	2.0	$6.2 \cdot 10^4$
Исходный, 5	1,	0.68	0.30	1.39	0.95	$8.4 \cdot 10^4$
Исходный, 1.97	0.4, \perp	0.81	0.35	1.3	0.37	$1.8 \cdot 10^5$
Исходный, 3.87	0.85, \perp	0.72	0.31	1.07	0.7	$7.9 \cdot 10^4$
Исходный, 4.5	2, \perp	0.74	0.32	1.01	1.7	$6.5 \cdot 10^4$
Отожженный, 2	0.4,	0.19 ± 0.02	0.085 ± 0.01	1.19 ± 0.05	0.34	$1.9 \cdot 10^5$
Отожженный, 4	2,	0.14 ± 0.02	0.06 ± 0.01	0.98	1.8	$7 \cdot 10^4$
Отожженный, 4	0.76,	0.19 ± 0.02	0.085 ± 0.01	1.02	0.61	$9.3 \cdot 10^4$
Деформированный всесторонним прессованием, 2.05	0.416	0.32 ± 0.02	0.14 ± 0.01	1.36 ± 0.05	0.37	$1.6 \cdot 10^5$

ударном нагружении параллельно и перпендикулярно направлению прокатки. Из сравнения с результатами опытов с тонкими образцами видно, что влияние ориентации нагрузки относительно текстуры на динамический предел упругости уменьшается с увеличением пройденного волной расстояния. При нагружении в поперечном направлении сплав, как и ранее, демонстрирует меньшее сопротивление разрушению и более быстрое его развитие.

В таблице приведены результаты измерений динамического предела упругости и откольной прочности сплава D16T в различных структурных состояниях, суммированы значения динамических пределов текучести σ_{γ} и откольной прочности $\sigma_{\text{сп.}}$, полученные при обработке измеренных профилей скорости свободной поверхности сплава. Приведены также соответствующие значения толщины откола $\sigma_{\text{сп.}}$ и максимальная скорость деформирования вещества \dot{V}/V_0 при разгрузке в падающем импульсе сжатия. При расчете величины $\sigma_{\text{сп.}}$ учитывалась нелинейность сжимаемости материала путем экстраполяции уравнения состояния в область отрицательных давлений. Величина откольной прочности $\sigma_{\text{сп.}}$ рассчитывалась по соотношению (2) для нулевого градиента скорости во фронте откольного импульса [3,10], что соответствует пологим минимумам на профилях скорости свободной поверхности. При этом поправка δ в (2) во всех случаях составляла 8.5% от измеренной величины Δu_{fs} .

Как известно, пластическая деформация осуществляется путем сдвигов в направлениях, ориентированных под углами, близкими к 45° к главным осям, в нашем случае — к направлению сжатия. Различие условий одноосного сжатия в направлении прокатки и в поперечном направлении заключается в том, что в первом случае все сдвиги происходят под углом 45° к волокнам текстуры, в то время как во втором случае часть сдвигов должна происходить путем смещения волокон текстуры друг относительно друга. Несколько более высокие значения динамического предела текучести сплава, полученные при сжатии в направлении, перпендикулярном направлению прокатки, свидетельствуют, по-видимому, о том, что смещение волокон текстуры друг относительно друга при высокоскоростной деформации затруднено. Из того, что наблюдаемое различие значений предела текучести уменьшается с увеличением пройденного волной расстояния, следует, что это различие связано преимущественно с вязкой (релаксационной) компонентой действующего напряжения.

Обращает на себя внимание значительное различие во влиянии отжига на статическую твердость сплава и его динамический предел текучести: отжиг привел примерно к двукратному падению твердости, в то время как динамический предел текучести уменьшился в четыре-пять раз. Отжиг сплава приводит к укрупнению частиц избыточной фазы; при этом их количество уменьшается.

Вероятно, можно утверждать, что в условиях высокоскоростной деформации потери энергии на преодоление дислокациями наноразмерных препятствий дают больший вклад в сопротивление деформированию, чем в квазистатических условиях.

Высокоскоростное разрушение при больших перенапряжениях в материале происходит путем роста и слияния многочисленных несплошностей, зарождающихся на границах зерен и включениях, и завершается перколяцией несплошностей в направлении, поперечном направлению растяжения. Результаты проведенных измерений не выявили каких-либо свидетельств существенной задержки разрушения, которая могла бы проявиться, например, в различии длительности первой и последующих ревербераций волн в откалывающейся пластине. Измеренные значения откольной прочности соответствуют условиям зарождения разрушения. Для зарождения и начальной стадии роста сферических пор направление растяжения не имеет значения.

Наблюдавшееся в данной работе различие значений откольной прочности в зависимости от ориентации ударной нагрузки, вероятно, является следствием того, что потенциальные очаги разрушения имеют вытянутую форму и ориентированы в направлении прокатки. В этой связи заметим, что в условиях одноосной деформации разность напряжений, действующих в продольном и поперечном направлениях, равна пределу текучести материала. Из таблицы видно, что различие значений откольной прочности в идентичных условиях испытаний исходного материала близко к величине динамического предела текучести, из чего следует, что значения разрушающих напряжений, действующих в направлении, перпендикулярном к направлению прокатки, сохраняются при изменении направления ударной нагрузки. Более быстрое завершение откольного разрушения при нагружении в поперечном направлении объясняется, очевидно, тем, что в прокатанном материале расстояние между потенциальными очагами разрушения в направлении текстуры меньше, чем в поперечном направлении, и соответственно состояния перколяции достигается быстрее.

Заключение

Представлены результаты измерений динамических пределов текучести и прочности алюминиевого сплава D16T в условиях нагружения испытываемых образцов плоскими ударными волнами субмикросекундной длительности. Эксперименты проведены с исходным (термообработанным) и отожженным материалом, а также с образцами сплава, подвергнутыми всестороннему прессованию при повышенных температурах. Варьировались направление нагрузки относительно текстуры материала, длительность и форма импульса ударного сжатия.

Показано, что измеряемые значения откольной прочности определяются не только общей длительностью

импульса ударной нагрузки, но и его формой, что следует учитывать при выборе условий испытаний. Установлено, что при ориентации направления ударной нагрузки перпендикулярно направлению прокатки сопротивление субмикросекундному разрушению меньше, а само разрушение завершается быстрее, чем при ударе в направлении прокатки. При этом найдено, что различие значений откольной прочности в зависимости от направления ударной нагрузки близко к величине предела текучести. Динамический предел текучести сплава демонстрирует обратную тенденцию. Отжиг приводит к значительному падению динамического предела текучести и откольной прочности материала. Уменьшение размера зерна в результате обработки всесторонним прессованием несколько повышает предел текучести, но не оказывает существенного влияния на величину откольной прочности отожженного материала. Отжиг и всестороннее прессование оказывают значительно большее влияние на динамический предел текучести, чем на квазистатическую твердость сплава.

Авторы выражают благодарность Л.Г. Ермолову и Г.Е. Иванчихиной за помощь в подготовке образцов и проведении экспериментов.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 06-02-17057-а) и федеральной целевой программы „Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007-2012 годы“ (Государственный контракт Федерального агентства по науке и инновациям № 02.513.11.3135).

Список литературы

- [1] Канель Г.И., Разоренов С.В., Уткин А.В., Фортвов В.Е. Ударно-волновые явления в конденсированных средах. М.: Янус-К, 1996. 407 с.
- [2] Канель Г.И., Фортвов В.Е., Разоренов С.В. // УФН. 2007. Т. 177. № 8. С. 809–830.
- [3] Antoun T., Seaman L., Curran D.R., Kanel G.I., Razorenov S.V., Utkin A.V. Spall Fracture. New York: Springer, 2003. P. 404.
- [4] Канель Г.И., Разоренов С.В., Фортвов В.Е. // Изв. РАН. МТТ. 2005. № 4. С. 86–111.
- [5] Minich R.W., Cazamias J.U., Kumar M., and Schwartz A.J. // Metall. Mater. Trans. A. 2004. № 35. P. 2663–2673.
- [6] Chen X., Asay J.R., Dwivedi S.K., Field D.P. // J. Appl. Phys. 2006. Vol. 99. P. 023 528.
- [7] Огородников В.А., Боровкова Е.Ю., Ерунов С.В. // ФГВ. 2004. Т. 40. № 5. С. 109–117.
- [8] Razorenov S.V., Kanel G.I., Savinykh A.S., Fortov V.E. // Shock Compression of Condensed Matter — 2005 / Ed. by M.D. Furnish et al. AIP Conf. Proc. 845. N.Y., 2006. P. 650–653.
- [9] Уткин А.В. // ПМТФ. 1997. Т. 38. № 6. С. 157–167.
- [10] Канель Г.И. // ПМТФ. 2001. Т. 42. № 2. С. 194–198.
- [11] Barker L.M. and Hollenbach R.E. // J. Appl. Phys. 1972. Vol. 43 (11). P. 4669–4675.

- [12] Канель Г.И. // ФГВ. 1982. Т. 4. С. 84–88.
- [13] Baumung K., Kanel G.I., Razorenov S.V., Rusch D., Singer J. and Utkin A.V. // J. Phys. IV France. 1997. Vol. 7. P. 3–927.
- [14] Furnish M.D., Reinhart W.D., Trott W.M., Chhabildas L.C. and Vogler T.J. // Shock Compression of Condensed Matter–2005 / Ed. by M.D. Furnish et al. AIP Conf. Proc. 845. N.Y., 2006. P. 615–618.
- [15] Глузман В.Д., Канель Г.И., Лоскутов В.Ф., Фортвов В.Е., Хорев И.Е. // Проблемы прочности. 1985. № 8. С. 52–56.
- [16] Gray III G.T., Bourne N.K., Zocher M.A., Maudlin P.J. and Millet J.C.F. // Shock Compression of Condensed Matter–1999 / ed. by M.D. Furnish, L.C. Chabildas, and R.S. Hixson. AIP Press. Woodbury. N.Y., 2000. P. 509–512.
- [17] Gray III G.T., Lopez M.F., Bourne N.K., Millett J.C.F., and Vecchio K.S. // Shock Compression of Condensed Matter–2001 / Ed. by M.D. Furnish, N.N. Thadhani and Y. Horie. AIP Press. Melville. N.Y., 2002. P. 479–482.