

УДК 539.4.015;539.4.019;539.411.5

**МЕХАНИЧЕСКОЕ ПОВЕДЕНИЕ УЛЬТРАМЕЛКОЗЕРНИСТЫХ СПЛАВОВ
ПРИ ВЫСОКИХ СКОРОСТЯХ ДЕФОРМАЦИИ**

© 2011 г.

В.А. Скрипняк, Н.В. Скрипняк

Томский госуниверситет

skrp2006@yandex.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Особенности механического поведения ультрамелкозернистых титановых, магниевых, алюминиевых сплавов и меди при квазистатическом и ударно-волновом нагружении с амплитудами до 10 ГПа исследованы методом численного моделирования. Для описания механического поведения сплавов использована многоуровневая модель, которая учитывает ряд структурных факторов, влияющих на механическое поведение крупнозернистых и ультрамелкозернистых сплавов. Полученные результаты свидетельствуют о существенном различии скоростной чувствительности напряжения течения у исследованных ГПУ и ГЦК крупнокристаллических и ультрамелкозернистых сплавов в диапазоне от 10^{-3} до 10^6 с $^{-1}$. Откольная прочность ГЦК-сплавов с ультрамелкозернистой структурой выше, чем у крупнокристаллических сплавов, но не превышает значений откольной прочности монокристаллов в диапазоне скоростей деформации от 10^3 до 10^6 с $^{-1}$.

Ключевые слова: ультрамелкозернистые сплавы, динамическое нагружение, скоростная чувствительность напряжения течения, откольная прочность.

Уменьшение размеров зерна в поликристаллических сплавах существенно увеличивает их твердость и статическую прочность при комнатной температуре, но сопровождается значительным снижением вязкости и пластичности. Механическое поведение ГЦК-, ГПУ-, ОЦК-сплавов с субмикронными размерами зерна при скоростях деформации от 10^3 до 10^6 с $^{-1}$ изучено недостаточно полно. Вместе с тем режимы механических воздействий, при которых реализуется высокоскоростная деформация субмикрокристаллических сплавов, имеют важное практическое значение. Открытыми остаются вопросы о возможности существенного повышения динамических прочностных характеристик сплавов, включая откольную прочность, при уменьшении размеров зерна до субмикронных размеров.

Методом компьютерного моделирования исследовались закономерности высокоскоростной деформации и откольного разрушения ГПУ и ГЦК сплавов (VT1-0, Ti 6-2222S, VT-6, Ti-6Al-4V), Mg-2, меди и алюминиевого сплава AA 6063T6 с размерами зерна 300–500 нм при ударно-волновом нагружении с амплитудами от 4 до 6 ГПа [1–5]. Представлены результаты моделирования на макроскопическом и мезоскопическом уровнях распространения плоских ударных волн в исследуемых сплавах. Рассмотрены условия высокоскоростного нагружения образцов сплавов ударом тонких алюминиевых пластин со скоростью от 600 м/с до 1200 м/с [1–5].

Для описания механического поведения металлов и сплавов с размерами зерна от 1 мкм до 100 нм при высокоскоростной деформации применялась двухуровневая модель, учитывающая физические механизмы пластической деформации. Рассматривался модельный структурированный объем ультрамелкозернистых (УМЗ) сплавов, образованный на мезоскопическом уровне зерна кристаллических фаз и границами раздела конечной толщины.

В рассматриваемых наноструктурных сплавах релаксация сдвиговых напряжений при гомологических температурах $T/T_m < 0.4$ обусловлена преимущественно дислокационными механизмами пластической деформации и двойникованием. Определяющие соотношения построены с учетом типа кристаллической решетки сплавов, температурного диапазона деформирования, параметров зеренной структуры.

Для оценки сопротивления динамическому разрушению использована величина разрушающего напряжения при отколе (откольная прочность материала). Для описания процесса разрушения при моделировании высокоскоростного соударения пластин использованы варианты моделей повреждаемых сред.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при размерах зерна от 0.5 до 100 мкм откольное разрушение является результатом протекания процессов зарождения центров разрушения и роста размеров.

На рис. 1а показаны зависимости разрушающих напряжений (откольной прочности) от скорости деформации в поликристаллических и ультрамелкозернистых алюминиевых сплавах, а на рис. 1б – соответствующие зависимости для технической чистой меди. Заполненными символами обозначены экспериментальные данные [4–7]. Линиями показаны теоретические прогнозы изменения разрушающего напряжения от логарифма скорости деформации в области формирования откольного разрушения.

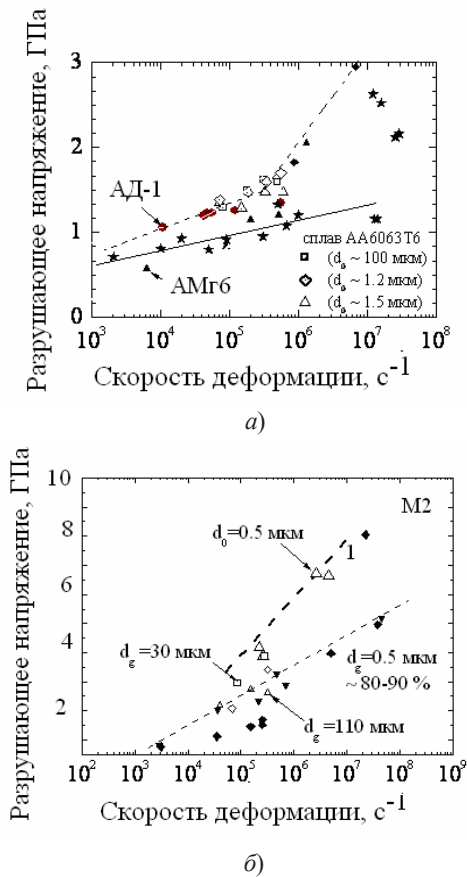


Рис. 1

В процессе откольного разрушения ультрамелкозернистых сплавов можно выделить три стадии, на которых эволюция структуры сопровождается зарождением центров разрушения, ростом их размеров и формированием зоны макроскопического разрушения (магистральной трещины). Длительность стадий и соответствующие значения плотности внутренней энергии в субмикроскопических сплавах отличаются от соответствующих значений, реализующихся в крупнокристаллических сплавах при сходных интенсивностях и длительностях импульсов. Зона откольного повреждения в одинаковых условиях нагружения имеет большую ширину в материалах с крупнокристаллической структурой.

Заключение

Проведенный анализ влияния размеров зерна на величину разрушающих напряжений при высокоскоростном растяжении показал, что откольная прочность ГЦК-сплавов с ультрамелкозернистой структурой выше, чем у крупнокристаллических сплавов, но не превышает значений откольной прочности монокристаллов в диапазоне скоростей деформации от 10^3 до 10^6 с⁻¹.

С увеличением дисперсии распределения зерен по размерам разрушающие напряжения уменьшаются, а характерное время зарождения центров разрушения возрастает. В результате ширина пространственной зоны откольного разрушения в сплавах с ультрамелкозернистой структурой оказывается меньше, чем в крупнокристаллических аналогах.

Зона разрушения в ультрамелкозернистых сплавах формируется из множества локальных очагов повреждений, размеры которых зависят от скорости деформации.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант №08-08-12055), Минобрнауки РФ АВЦП «Развитие научного потенциала высшей школы» (проекты 2.1.1/13521, 2.1.2/13526), ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы ГК № П 666 от 19.05.2010.

Список литературы

1. Скрипняк Е.Г., Скрипняк В.А., Козулин А.А., Скрипняк В.В. // Вестник Томского гос. ун-та. Математика и механика. 2010. Т. 11, №3. С. 120–128.
2. Скрипняк В.А., Скрипняк В.В., Тюлина Н.А. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. XI Харитоновские чтения: Тр. Междунар. конф. Саров, РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2009. С. 328–333.
3. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г. // Shock Wave in Condensed Matter: Тр. Междунар. конф. С.-Петербург–Новгород, 5–10 сент., 2010. С. 319–322.
4. Скрипняк В.А., Скрипняк Е.Г., Козулин А.А., Скрипняк Н.В. // XIX Петербургские чтения по проблемам прочности: Сб. матер. СПб., 2010. Ч. 2. С. 175–178.
5. Скрипняк В.А. и др. // Экстремальные состояния вещества. Детонация. Ударные волны. IX Харитоновские тематические научные чтения: Тр. Междунар. конф. Саров, РФЯЦ ВНИИЭФ. 2007. С. 369–373.
6. Гаркушин Г.В., Разоренов С.В., Игнатова О.Н. // Забыхинские научные чтения 2007: Сб. статей Междунар. конф. Снежинск, 2007. С. 5–15.
7. Гаркушин Г.В. и др. // Физическое материаловедение. Наноматериалы технического и медицинского назначения: Матер. докл. III Междунар. школы-конференции. Тольятти, 2007. С. 190–192.

MECHANICAL BEHAVIOUR OF ULTRAFINE-GRAINED ALLOYS UNDER HIGH STRAIN RATES*V.A. Skripnyak, N.V. Skripnyak*

Features of the mechanical behavior of ultrafine-grained titanium, magnesium, aluminium alloys and copper under quasi-static loading and shock-wave loading with the amplitudes below 10 GPa are investigated using a numerical simulation method. The multi-scale level model is used to describe the mechanical behavior of the alloys. The model accounts for a number of structural factors influencing the mechanical behavior of coarse-grained and ultrafine-grained alloys. The obtained results testify to essential distinction between strain-rate sensitivity of the yield stress of the investigated coarse grained and ultrafine-grained HCP and FCC alloys in the strain rate range of 10^{-3} to 10^6 s⁻¹. The spall strength of a UFG FCC alloys is higher than that of the coarse grained alloys, but does not exceed values of the spall strength of single crystals in the range of strain rates of 10^3 to 10^6 s⁻¹.

Keywords: ultrafine-grained alloys, dynamic loading, strain-rate sensitivity of the yield stress, the spall strength.