

УДК 669.71:539.382:620.179.17

С.В. МАКАРОВ, В.А. ПЛОТНИКОВ**, А.И. ПОТЕКАЕВ******МАКРОСКОПИЧЕСКАЯ КОРРЕЛЯЦИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ АКТОВ В СЛАБОУСТОЙЧИВОМ СОСТОЯНИИ
КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ РЕШЕТКИ ГЦК-МЕТАЛЛОВ¹**

Из анализа скачкообразной деформации и акустической эмиссии делается вывод об активной роли акустической эмиссии в активации, а главное – в синхронизации, элементарных деформационных актов в макроскопическом масштабе. При этом макроскопический масштаб обусловлен волновой природой синхронизации элементарных актов в поле напряжений, формирующих слабуюстойчивое состояние кристаллической решетки деформируемого материала. Определяющую роль играет интерференция волновых пакетов сигналов акустической эмиссии, приводящая к макроскопическому распределению критических колебательных смещений в слабуюстойчивой кристаллической среде.

Ключевые слова: слабуюстойчивое состояние, деформация, акустическая эмиссия.

Введение

Особое состояние кристаллической решетки, именуемое слабуюстойчивым, может быть связано с состоянием атомного ансамбля в поле механических напряжений и тепловых флуктуаций, совместное действие которых позволяет преодолеть потенциальный барьер разрыва связи [1, 2]. Существует широкий класс явлений, связанных с разрывом межатомных связей. К таким явлениям относятся процессы диффузии, трещинообразования, пластической деформации и др. Осуществление элементарного акта разрыва связи, например при пластической деформации, возможно при совместном действии механических напряжений и флуктуации энергии, локализованных в ограниченном ансамбле взаимодействующих атомов [2]. Моделирование таких флуктуаций в атомной системе позволило установить, что значительная флуктуация энергии может соответствовать достаточно устойчивому динамическому состоянию, являющемуся результатом интерференции (взаимодействия фононов) [3].

До настоящего времени подобные представления не учитывают акустическую эмиссию и ее роль в процессах пластической деформации. В [1, 4] установлено, что в условиях термомеханического воздействия на протяжении всего процесса нагрева наблюдается накопление деформации, сопровождающееся акустической эмиссией. Характерны два варианта накопления деформации (монотонное и скачкообразное) и два варианта проявления акустической эмиссии – монотонный и импульсный (дискретный). Показано, что амплитуда акустического сигнала может характеризовать корреляцию в ансамбле элементарных излучателей, то есть в ансамбле элементарных деформационных актов.

В рамках модели автоакустической эмиссии [5] скачкообразная деформация и дискретная акустическая эмиссия свидетельствуют о пространственно-временном упорядочении движения дефектов в кристалле. В этом случае кристалл представляет собой автоколебательную систему, для которой характерно возбуждение колебаний, а микроскопические процессы происходят кооперативно и самосогласованно, способствуя синхронизации колебаний и возбуждению квазипериодических релаксационных колебаний.

Синхронизация и самосинхронизация мод излучения является, фактически, интерференцией волн напряжений с различными частотами. В основе этих процессов лежит корреляция элементарных излучателей в неравновесной (активной) среде, приводящая к формированию коротких импульсов сжатия и растяжения, длительность которых тем меньше, чем больше волн с различными частотами участвуют в процессе [6].

Такие волны характеризуют напряженное состояние вблизи структурных дефектов при внешних воздействиях. В этом случае разрушение представляет собой разрыв наиболее напряжен-

¹ Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218.

ных связей не только тепловыми, но и акустическими флуктуациями (автоакустическими флуктуациями в терминах [6]). Фактически, об этом же говорится в [7, 8], однако приведенные данные позволяют заключить, что в этих работах обсуждается частный случай фокусировки акустического излучения в деформированной среде.

Эксперименты по фиксации локализации деформации при деформировании моно- и поликристаллов алюминия и других металлов установили [9], что в ходе пластической деформации в направлении растяжения распространяются один или несколько очагов деформации в зависимости от стадии пластической деформации, в которых локализовано пластическое течение, свидетельствующее о пространственной и временной корреляции элементарных деформационных актов. Такая локализация деформации является результатом фокусировки импульсов акустической эмиссии и формирования нового очага деформации [7, 8]. Локализация неустойчивости кристаллической структуры при пластической деформации кристаллов для классической трехстадийной зависимости механическое напряжение – относительная деформация связывается с процессом самоорганизации дислокаций [10].

Цель данной работы – провести анализ роли акустической эмиссии в локализации пластической деформации металлической системы в слабоустойчивом состоянии. Будем рассматривать макроскопические деформационные скачки и аномально высокоамплитудные сигналы акустической эмиссии, обнаруженные при высокотемпературной деформации алюминия [11, 12], как результат потери устойчивости кристаллической решетки в слабоустойчивом состоянии системы и корреляции элементарных деформационных актов в области локализации пластического течения в условиях действия статических и динамических (акустических) сил.

Накопление деформации при высоких температурах

При высокотемпературном нагружении ГЦК-металлов (например, медь или алюминий) наблюдается два характерных варианта накопления деформации: монотонное накопление при нагрузках менее 0.5 предела текучести и скачкообразное накопление при нагрузках выше 0.5 предела текучести. Как показано на рис. 1, *а, б*, монотонное накопление деформации в алюминии составляет в итоге малую величину (~ 0.5 %), в то время как скачкообразное накопление представляет собой макроскопические деформационные акты величиной до 0.5 % при нагрузке ~ 19 МПа. В то же время в меди (рис. 1, *в, г*) величина скачкообразной деформации составляет ~ 0.25 % при нагрузке ~ 40 МПа.

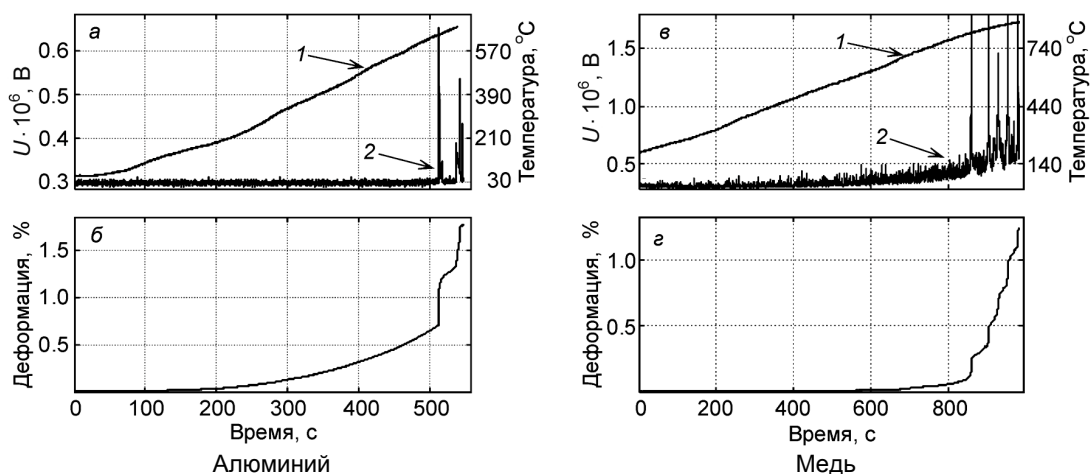


Рис. 1. Монотонный и скачкообразный характеры накопления деформации (*б, г*) и высокоамплитудные импульсы акустической эмиссии (*а, в*) при механическом напряжении в области слабоустойчивых состояний вблизи предела текучести в неизотермическом термомеханическом цикле для алюминия и меди: кр. 1 – температура в цикле; кр. 2 – среднеквадратичное напряжение акустической эмиссии

Следует отметить, что монотонное накопление деформации наблюдается при всех температурах, причем в низкотемпературной области монотонное накопление характерно при любых нагрузках, а в высокотемпературной области деформационные скачки перемежаются с монотонными участками. Таким образом, накопление деформации в высокотемпературной области слабоус-

тойчивых состояний представляет собой некоторую квазипериодическую последовательность макроскопических деформационных скачков.

Высокотемпературный процесс накопления деформации сопровождается продуцированием сигналов акустической эмиссии, представляющих собой совокупность как низкоамплитудных, так и высокоамплитудных импульсов. Низкоамплитудные сигналы продуцируются в ходе монотонного накопления деформации, а высокоамплитудные – совпадают со скачкообразным накоплением, причем в меди амплитуда единичных акустических сигналов примерно в 2 раза выше амплитуды соответствующих сигналов в алюминии.

Акустический критерий корреляции элементарных деформационных актов при высокотемпературной деформации

Высокоамплитудные сигналы акустической эмиссии, связанные с макроскопическими деформационными скачками, так же как и сами скачки имеют квазипериодический характер. Естественно, что высокоамплитудные сигналы акустической эмиссии в алюминии и меди свидетельствуют о корреляции в системе элементарных деформационных актов в условиях состояния слабой устойчивости и неустойчивости деформируемого металла. Структурным признаком эффекта корреляции является формирование деформационных полос, сопровождаемых высокоамплитудными сигналами акустической эмиссии [13]. Из макроскопического характера деформационных скачков следует, что эффект корреляции может охватывать дислокационный ансамбль в масштабе более чем одна деформационная полоса.

При росте температуры наблюдается экспоненциальный рост активационного объема [4], что свидетельствует о существенном увеличении масштаба кооперативных атомных перемещений, контролирующих единичный деформационный акт. В то же время это говорит о росте элементарного объема (объема активации), в котором проявляется локальная слабая устойчивость (вплоть до локальной неустойчивости) кристаллической решетки. Сопоставление экспоненциального роста активационного объема и скачкообразного характера накопления деформации выявляет рост корреляции элементарных деформационных актов.

Как было показано ранее [1, 4], амплитуда акустического сигнала (точнее, квадрат амплитуды) может служить мерой корреляции элементарных деформационных актов в связи с тем, что выход на поверхность системы дислокационных сегментов одной системы скольжения генерирует систему когерентных акустических волн, интерференция которых формирует единичный акустический сигнал аномально большой амплитуды.

Работа одной системы скольжения определяет некоторый элементарный объем, который можно назвать объемом корреляции. В силу макроскопического характера деформационного скачка получаем макроскопическую величину объема корреляции, который представляет собой совокупность элементарных объемов, связанных с полосами деформации. В макроскопический объем корреляции входят лишь те деформационные полосы, которые образуют когерентный ансамбль акустических излучателей, интерференция которых и формирует единичный акустический сигнал.

Слабоустойчивое состояние кристаллической решетки и волновая синхронизация элементарных деформационных актов

Из проведенного анализа следует, что макроскопический объем возможных элементарных источников акустической эмиссии должен стать, как и в [5, 6], синхронизованным ансамблем излучателей. Очевидно, что такая синхронизация может быть осуществлена волновым путем. Сигнал акустической эмиссии, продуцируемый в ходе формирования одной деформационной полосы, распространяется от источника в виде волнового пакета, фаза колебаний в котором определяет знак смещения атомов из положения равновесия. Эти периодические смещения накладываются на статические смещения атомов, которые обусловлены статическим полем напряжений, локализованных на неоднородностях структуры.

Слабоустойчивое состояние кристаллической решетки является определяющим фактором для волновой синхронизации системы элементарных деформационных актов. Очевидно, что внешнее механическое воздействие (поле напряжений), локализованное на дефектах, переводит кристаллическую среду в состояние слабой устойчивости в связи со снижением эффективного порога активации ($U_0 - \gamma\sigma$) фактически до нуля. В таком состоянии колебательное смещение волны достаточ-

но для активации дислокационного скольжения, т.е. фактически атермического надбарьерного скольжения.

Иными словами, в уравнении для времени ожидания разрыва связи [2, 14] следует учитывать не только работу статических сил, но еще и работу динамических сил:

$$\tau(\sigma, T) = \tau \exp[(U_0 - \gamma\sigma - Ud) / kT]. \quad (1)$$

Здесь величина U_0 для данного металла является константой, в то время как слагаемое $\gamma\sigma$, представляющее собой работу внешних статических, локализованных на малом атомном ансамбле сил, может значительно меняться в связи с изменением величины параметра γ в широких пределах и на порядки величины превосходить атомный объем [6], Ud – работа динамических сил акустической волны.

Таким образом, эффективный порог активации уменьшается за счет тепловых флуктуаций, за счет работы статических сил, локализованных на структурном элементе, а также за счет работы динамических сил акустической волны. Работа динамических сил от распространяющегося акустического импульса оказывает возмущающее действие на совокупность систем скольжения, срабатывание которых будет зависеть от фазы колебаний в акустическом волновом пакете.

Волновая синхронизация элементарных деформационных актов. Режим бегущей волны

Колебательные смещения, распространяющиеся в напряженной среде волнового пакета, активируют скольжение дислокаций в плоскости скольжения, попавшей в макроскопический объем корреляции. В связи с затуханием амплитуда колебаний в волновом пакете уменьшается, что приводит к прекращению скольжения в данной системе скольжения.

Однако активируемая система скольжения формирует сигнал акустической эмиссии, который может активировать процесс скольжения дислокаций. При этом активируется скольжение в другой системе скольжения, формируя новый волновой пакет. Таким образом, формируется система акустических сигналов, которая слабо коррелирована. Экспериментально (см. рис. 1) такая ситуация соответствует монотонному накоплению деформации и росту среднеквадратичного напряжения акустической эмиссии при повышении температуры деформации.

Ударные волны в слабоустойчивой кристаллической среде

Генерирование ударных волн в кристаллах при эволюции кристаллической среды широко обсуждается благодаря возможности компьютерного моделирования этих процессов [15]. Можно констатировать, что генерирование ударных волн связано с процессами релаксации дефектной структуры в кристаллах, трансформацией ударной волны в продольную звуковую, возникновением эстафетных атомных смещений. Фактически, в слабоустойчивой кристаллической среде (по существу, в активной среде) возбуждаются нелинейные колебания.

Режим стоячей волны

Совсем другая ситуация реализуется при возникновении стоячей акустической волны, для формирования которой необходима интерференция двух волн, распространяющихся навстречу друг другу [16]. В деформируемом образце такая ситуация возможна при отражении волнового пакета от внешней границы, то есть образец должен представлять своеобразный резонатор для формирования системы падающих и отраженных волн. На расстоянии $\lambda/2$ (λ – длина бегущей волны) друг от друга в стоячей волне расположены узловые точки, в которых колебания отсутствуют. Посередине между двумя узлами лежат пучности, в которых амплитуда колебаний максимальна и равна, в идеальном случае, удвоенной амплитуде бегущей волны.

Особенностью такой волновой ситуации является периодическое (с периодом $T/2$, где T – период колебаний в бегущей волне) исчезновение колебаний, а максимум амплитуды колебаний достигается в промежутках между этими событиями. Существенно, что в каждый последующий момент фаза колебаний в пучностях меняется на π . В то же время максимум давления формируется в узловых точках, в которых периодически меняется фаза, соответственно заменяя растяжение сжатием.

В связи с затуханием и потерями на излучение стоячие волны возможны лишь при компенсации потерь колебательной энергии за счет работы всей системы излучателей, отвечающих критерию резонатора. В этом случае стоячая волна может быть представлена как суперпозиция бегущих и отраженных волн с разными амплитудами. Для трехмерного случая интерференционная картина

представляет собой систему узлов и пучностей, расположенных в плоскостях, параллельных границе резонатора.

Таким образом, макроскопические деформационные скачки могут быть связаны с образованием стоячих волн в слабоустойчивой кристаллической среде, формируемой полем механических напряжений, совместное действие которых приводит к синхронизации пластических сдвигов в масштабе, определяемом длиной волны.

Заключение

Из проведенного анализа скачкообразной деформации и акустической эмиссии неизбежно следует вывод об активной роли акустической эмиссии в активации, а главное – в синхронизации элементарных деформационных актов в макроскопическом масштабе. Макроскопический масштаб обусловлен волновой природой синхронизации элементарных актов в поле напряжений, формирующих слабоустойчивое состояние кристаллической решетки деформируемого материала. В этой связи определяющую роль играет интерференция волновых пакетов сигналов акустической эмиссии, приводящая к макроскопическому распределению критических колебательных смещений в слабоустойчивой кристаллической среде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2011. – Т. 54. – № 3. – С. 43–54.
2. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
3. Слуцкер А.И., Михайлин А.И., Слуцкер И.А. // УФН. – 1994. – Т. 164. – № 4. – С. 357–366.
4. Макаров С.В., Плотников В.А., Потекаев А.И. // Изв. вузов. Физика. – 2013. – Т. 56. – № 6. – С. 23–30.
5. Бовенко В.Н. // Изв. АН СССР. Металлы. – 1984. – № 1. – С. 129–137.
6. Бовенко В.Н. // Изв. АН СССР. Сер. физич. – 1986. – Т. 50. – № 3. – С. 509–512.
7. Зуев Л.Б., Баранникова С.А., Зариковская Н.В., Зыков И.Ю. // ФТТ. – 2001. – Т. 43. – № 8. – С. 1423–1427.
8. Зуев Л.Б., Семухин Б.С., Зариковская Н.В. // ЖТФ. – 2001. – Т. 71. – № 5. – С. 57–62.
9. Зуев Л.Б., Данилов В.И., Горбатенко В.В. // ЖТФ. – 1995. – Т. 65. – № 5. – С. 91–103.
10. Малыгин Г.А. // УФН. – 1999. – Т. 169. – № 9. – С. 979–1010.
11. Плотников В.А., Макаров С.В. // Изв. вузов. Физика. – 2005. – Т. 48. – № 11. – С. 33–38.
12. Плотников В.А., Макаров С.В. // Деформация и разрушение материалов. – 2005. – № 3. – С. 27–31.
13. Плотников В.А., Макаров С.В. // ФММ. – 2008. – Т. 105. – № 4. – С. 424–430.
14. Слуцкер А.И. // ФТТ. – 2004. – Т. 46. – № 9. – С. 1606–1613.
15. Старостенков М.Д., Маркидонов А.В., Тихонова Т.А. // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2009. – Т. 6. – № 1. – С. 12–16.
16. Исаакович М.А. Общая акустика. – М., 1973.

*Алтайский государственный университет, г. Барнаул, Россия

**Институт физики прочности и материаловедения СО РАН,
г. Томск, Россия

***Сибирский физико-технический институт им. В.Д. Кузнецова
Томского государственного университета, г. Томск, Россия
E-mail: kanc@spti.tsu.ru

Поступила в редакцию 12.08.13.

Макаров Сергей Викторович, к.ф.-м.н., доцент каф. общей и экспериментальной физики;

Плотников Владимир Александрович, д.ф.-м.н., профессор, зав. каф. общей и экспериментальной физики АлтГУ, ведущ. науч. сотр. ИФПМ СО РАН;

Потекаев Александр Иванович, д.ф.-м.н., профессор, директор.