

Рис. 2. Зависимость величины эффекта обратимой памяти форм от остаточной деформации в образцах сплава $Ti_{40.7}Hf_{9.5}Ni_{44.8}Cu_5$ с объемной долей кристаллической фазы 40%, 70% и 100%.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ДВОЙНИКОВ С ПЛАСТИЧЕСКИ ДЕФОРМИРОВАННЫМИ ЗОНАМИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ ЦИНКА

Башмаков В. И., Чикова Т. С., Ховатов П. А., Гей С. Л.

Гродненский государственный университет им. Я. Купалы, Гродно, Беларусь
t.chikova@grsu.by

В [1, 2] отмечалось, что деформационные двойники, зарождающиеся при микроиндентировании кристаллов пирамидкой Виккерса, приводят к искажению формы отпечатков микротвердости. В [1] просто констатируется, что наличие двойников вызывает «причудливость формы отпечатка». В [2] в экспериментах использовались такие нагрузки, при которых у отпечатка одновременно возникало 10-12 клиновидных двойников, развивающихся в пересекающихся плоскостях. Определить результирующее влияние такого количества двойников на форму отпечатка крайне трудно.

Наиболее результативным подходом к изучению формирования упруго-пластической зоны, создаваемой алмазной пирамидкой Виккерса при зарождении и развитии деформационных двойников, является использование концентрированной нагрузки, что учитывает особенности зарождения и развития деформационных двойников. Деформирование монокристаллов проводилось путем микроиндентирования плоскости (0001) монокристаллов цинка алмазной пирамидкой Виккерса на автоматическом микротвердомере НВММТ-Х7 (Япония).

Квадратная в сечении параллельном поверхности кристалла пирамидка и гексагональная решетка образца не имеют общей оси симметрии, поэтому при любой их взаимной ориентации должна проявляться анизотропия деформации по плоскостям базиса (0001) $\langle 1120 \rangle$, пирамиды $\{1122\} \langle 1123 \rangle$ и призмы $\{1012\} \langle 1120 \rangle$, что хорошо известно [1]. В работе изучено взаимодействие механических двойников, возникающих у отпечатка, с отпечатком как упруго-пластической зоной, созданной скольжением по указанным плоскостям.

Шесть плоскостей двойникования в цинке $\{1012\}\langle 1020\rangle$ составляют с плоскостью (0001) угол 47 градусов и кристаллографически равноправны относительно концентрированной точечной нагрузки, перпендикулярной плоскости базиса. Однако 136-градусная алмазная пирамидка при своем погружении в кристалл создает сложные напряжения в кристаллической решетке, сдвиговые составляющие которых в разных плоскостях двойникования отличны по величине. Существует единственная возможность стимулировать зарождение и развитие двойников у отпечатков одной из трех возможных ориентаций. Для этого необходимо, чтобы диагональ отпечатка совпадала с одной из линий пересечения плоскостей двойникования с плоскостью спайности. В этом случае ребро пирамидки выполняет роль ножа, как в экспериментах по двойникованию кристаллов кальцита [3], и две противоположные вершины отпечатка становятся местами преимущественного зарождения двойников. Двойники других кристаллографических плоскостей будут составлять угол 15 градусов с нормальными к границам отпечатка. Эта идея была экспериментально реализована в данной работе. На рис. 1 схематически показана геометрия трех возможных ориентировок отпечатка и механических двойников на плоскости наблюдения. Есть основание полагать, что зарождение двойников у вершин отпечатка контролируется внешней нагрузкой на индентор, а у сторон отпечатка – внутренними напряжениями у концентраторов, создаваемых предшествующим двойникованию скольжением. Места зарождения двойников у сторон отпечатка заранее предсказать невозможно.

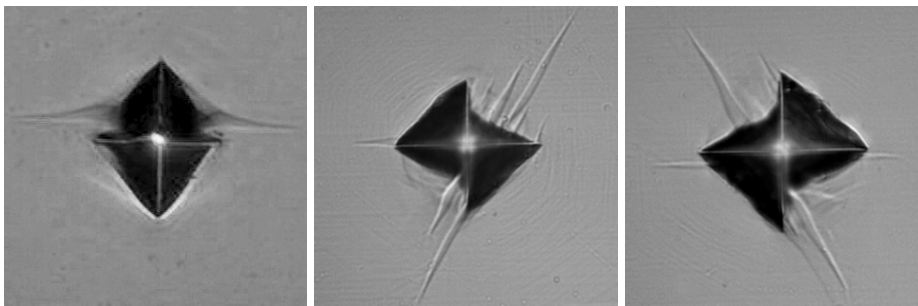


Рис. 1. Клиновидные деформационные двойники у отпечатков пирамидки Виккерса в монокристаллах цинка, полученные в идентичных условиях.

Каждый отпечаток формировался при ступенчатом повышении усилия на индентор со значениями: 0,01; 0,03; 0,05; 0,1; 0,25 и 0,5 Н. Кристалл выдерживался под нагрузкой 10 с, время между ступенями нагружения составляло 2-3 минуты, скорость опускания пирамидки – 50 мкм/с. После каждой ступени нагружения отпечаток фиксировался оптической видеокамерой с разрешением 1280x1024 pixel. После каждой серии ступенчатого нагружения делался контрольный отпечаток при однократном нагружении с максимальной нагрузкой 0,5 Н.

Прежде всего, следует отметить, что, сравнивая отпечатки, полученные при однократном нагружении, трудно анализировать суммарную деформацию и еще труднее делать обобщающие заключения. Очевидно лишь, что суммарная деформация двойникованием, число двойников и их распределения по ориентациям никогда не являются однозначной функцией приложенных к кристаллу напряжений. Конечный результат зависит от предыстории образца, которая включает не только режим нагружения, но и последовательность сдвиговых процессов по различным системам скольжения, которая имеет случайный характер.

Главным отличием формирования деформационной зоны при однократном и ступенчатом приложении сосредоточенной нагрузки является ориентационная селективность двойникования при ступенчатом нагружении. У каждого отпечатка зарождаются двойники только одной из трех возможных ориентаций, в то время как под действием

максимальной однократной нагрузки двойникование развивается сразу в нескольких пересекающихся плоскостях. Следует отметить, что это утверждение справедливо только для выбранной взаимной ориентации образца и пирамидки.

Первые двойники зарождаются при достижении отпечатков определенных размеров, при этом величина нагрузки на индентор и размеры отпечатка, соответствующие зарождению первых двойников, выражены нечетко. В монокристаллах цинка при комнатной температуре зарождение двойников, как правило, начинается при нагрузках на индентор 0,02 – 0,05 Н. Однако встречаются отпечатки без двойников, соответствующие нагрузке 0,1 Н. На основании статистических оценок можно утверждать, что диагональные двойники возникают под действием меньших нагрузок, чем двойниковые прослойки в других кристаллографических плоскостях.

При малых нагрузках до появления клиновидных двойников отпечатки имели форму квадрата. Возникновение механических двойников приводит к изменению формы отпечатков (рис. 1.). Они превращаются в искаженные ромбы с существенно отличающимися диагоналями или в четырехугольники с вогнутыми сторонами. При появлении двойников нарушается тождественность напряженных состояний в окрестностях отпечатков, двойниковые границы являются местами сосредоточения больших внутренних напряжений и служат областями возникновения ориентированных напряжений.

Характер искажения отпечатков однозначно связан с ориентацией деформационных двойников. Линии симметрии двойников, искажающих стороны отпечатков, никогда не проходят через центр отпечатка, что свидетельствует о непричастности к зарождению двойникования максимальных напряжений, создаваемых индентором под вершиной отпечатка. Это релаксационные двойники, зарождающиеся на концентраторах напряжений, создаваемых предшествующим двойникованию скольжением. Большинство релаксационных двойников имеют клиновидную форму с максимальной толщиной клина в месте стыковки с отпечатком. Это позволяет утверждать, что источники двойникующих дислокаций активируются на гранях отпечатка и двойникующие дислокации перемещаются из более искаженных областей кристалла у отпечатка в сторону более совершенной решетки вдали от него. Зарождение и рост релаксационных двойников сопровождается появлением вогнутости сторон отпечатка. Причиной изменения геометрии отпечатка в этом случае являются обратимые изменения размеров упруго-пластической зоны под отпечатком. Об обратимости пластической деформации под отпечатком свидетельствует изменение его глубины после появления релаксационных двойников, выявленное методами атомной силовой микроскопии.

Описанный механизм образования и роста релаксационных двойников не единственный. Обнаружен вариант деформирования в зоне отпечатка, когда двойник линзообразной формы, не имеющий контакта с отпечатком, при повышении нагрузки на индентор притягивается к отпечатку и после стыковки с ним превращается в клиновидный с максимальной толщиной у устья. При более высоких нагрузках часто наблюдается обратный процесс: в результате возбуждения источников двойникующих дислокаций на границах в средней части двойника его толщина увеличивается, а в устье – уменьшается, двойник отрывается от отпечатка и превращается в линзообразную двойниковую прослойку. Подобные случаи взаимодействия двойникования и скольжения свидетельствуют о том, что проблем генерирования двойникующих дислокаций или их стока в условиях развитой пластической деформации в гексагональной кристаллической решетке цинка не существует.

Несколько иное влияние на отпечаток оказывают диагональные двойники. Их появление не сопровождается скачкообразным изменением формы отпечатка, то есть, отсутствуют металлографически наблюдаемые эффекты, которые можно трактовать как результат релаксации напряжений в упруго-пластической зоне под отпечатком.

Выявлено два вида взаимодействия двойников с отпечатком: скачкообразная обратимость пластической деформации при зарождении двойников и армирующее дейст-

вие двойниковых границ при развитии отпечатка с дополнительной нагрузкой на индентор.

Список литературы

1. Григорович В.К. Твердость и микротвердость металлов. М.: Наука, 1976. – 230 с.
2. Башмаков В. И., Чикова Т. С. Эволюция геометрии двойниковых границ в висмуте при увеличении нагрузки // Кристаллография. – 2002. – Т. 47, № 3. – С. 537–542.
3. Бойко В.С., Гарбер Р.И., Косевич А.М. Обратимая пластичность кристаллов. М.: Наука, 1991, – 278 с.

ПОЛЯРИЗАЦИИ МРАМОРА В ПОЛЕ УПРУГИХ СИЛ ПРИ ЗАДАННЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Махмудов Х. Ф.

Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия
h.machmoudov@mail.ioffe.ru

Исследовались механо-электрические эффекты при слабой электрической поляризации и при упругой деформации образцов мрамора. Показано, что релаксация поляризации в обоих случаях идентична по природе и имеет в основе термоактивационный процесс. Получена температурная зависимость времени релаксации электрических полей. Изучен процесс релаксации индуцированного потенциала и сделана оценка энергии активации этого процесса. Предложен механизм релаксации индуцированного потенциала. Регистрация релаксации индуцированного потенциала электрического поля в образце производилась бесконтактным способом при помощи специально изготовленного электрометра (ЭМ) с большим входным сопротивлением с последующими записями сбора и обработки входных токов в систему A-Line 32D.

Введение

Зависимости релаксации в первом приближении могут быть описаны уравнением кинетики первого порядка: $\varphi_t = \varphi_0 [1 - \exp(-t/\tau)]$, где φ_t – текущее значение измеряемого потенциала (в различные моменты времени t), φ_0 – начальное значение φ . Величина $\tau = K^{-1}$, где K характеризуется как константа скорости протекания процесса релаксации. Поскольку K характеризует процесс протекания релаксации, можно записать термоактивационное уравнение для константы скорости: $K = K_0 \exp[-E/RT]$ где E – энергия активации процесса релаксации, T – абсолютная температура, R – газовая постоянная. Энергия активации процесса релаксации является важнейшей энергетической характеристикой этого процесса на атомном уровне. Поэтому ее оценка представляет большой интерес. Ее величину можно получить, если измерить $K = 1/\tau$ релаксационные зависимости при разных температурах, и можно оценить кинетические параметры процесса релаксации, в частности, энергию активации E . В связи с этим были проведены эксперименты по механической и электрической поляризации в интервале температур 20–200°С (см. таблицу).

Методика измерений

Измерение релаксации ИЭП проводилось следующим образом. Образец помещался в термостат и выдерживался в нем при заданной температуре ~ 1 час, для надежного прогрева всего объема образца. Затем образец вынимался и сразу же проводились измерения, при механически упругом нагружении образца (P), и при приложении разности потенциалов к специально закрепленным электродам на поверхность образца. При необходимости электроды могли заземляться.

Регистрация потенциалов электрического поля в образце производилась бесконтактным способом при помощи специально изготовленного электрометра (ЭМ) [7], с большим входным