

05;10

## **Экспериментальное определение преимущественных механизмов релаксации напряжений при деформации металлов с гексагональной плотноупакованной решеткой**

© Н.В. Камышанченко, И.С. Никулин, Е.С. Кунгурцев,  
М.С. Кунгурцев

НИУ „Белгородский государственный университет“  
E-mail: sensarg@rambler.ru

Поступило в Редакцию 22 января 2013 г.

Экспериментально изучена стадийность процесса пластической деформации двойнящихся материалов на примере титана марки ВТ1-0. С помощью анализа регистрируемых в процессе микроиндентирования сигналов акустической эмиссии (АЭ) установлены механизмы упрочнения и релаксации напряжений.

Процесс двойникования широко исследуется в связи с тем, что возникновение двойниковых образований внутри кристалла способствует измельчению зеренной структуры материала и приведению его в субмикроструктурное и наноструктурное состояние [1], что в свою очередь оказывает существенное влияние на физико-механические свойства.

К настоящему моменту опубликовано значительное количество теоретических и экспериментальных работ, посвященных роли двойникования и скольжения в развитии процесса пластической деформации металлов [2–4]. При этом выводы в этих работах делаются по косвенным признакам и не дают достаточно полной и достоверной оценки вклада действующих при этом механизмов в суммарную пластическую деформацию.

Исследование отдельных двойниковых прослоек в реальных поликристаллических материалах связано с рядом трудностей, к которым относятся высокая динамика процесса двойникования и непредсказуемость образования и развития двойников в кристаллах с большим

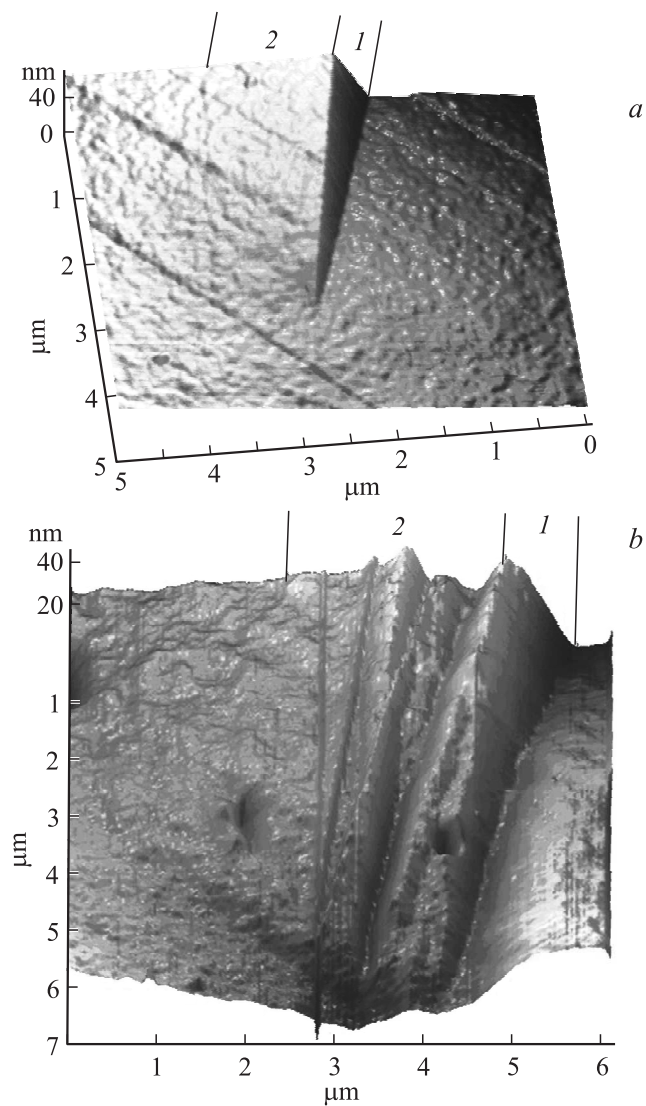
количеством дефектов [5]. В представленной работе был использован комплексный микроскопический анализ, а также метод регистрации сигналов акустической эмиссии, что позволило проанализировать как процесс локальной деформации, так и его последствия.

В качестве экспериментального материала в работе использовались образцы из титана марки ВТ1-0, которые подвергались деформации прокаткой на  $\varepsilon = 75\%$  и отжигу при температуре  $700^\circ\text{C}$ . Вырезанные пластины размером  $10 \times 10 \text{ mm}$  и толщиной  $1.5 \text{ mm}$  проходили шлифовку, полировку и электрополировку. С помощью растрового электронного микроскопа „Quanta 200 3D“ на поверхности образца производился анализ картин дифракции обратнорассеянных электронов. По полученным картам разориентировок с помощью программы „OIM Analysis 5.2“ выбирались зерна с ориентацией (0001) к поверхности образца. С помощью алмазной пирамидки Виккерса, жестко закрепленной в динамометре, соединенном с верхней траверсой универсальной испытательной машины „INSTRON 5882“, проводилось индентирование выбранных зерен с постоянной скоростью перемещения  $0.8 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  до нагрузки  $6 \text{ N}$ . Автоматически проводилось построение графика „нагрузка–деформация“. Одновременно с нагружением регистрировались сигналы акустической эмиссии, излучаемой образцом в процессе внедрения индентора. После указанной деформации проводились оптические, зондовые и растрово-электронные исследования поверхности образцов в зоне индентирования до и после химического травления.

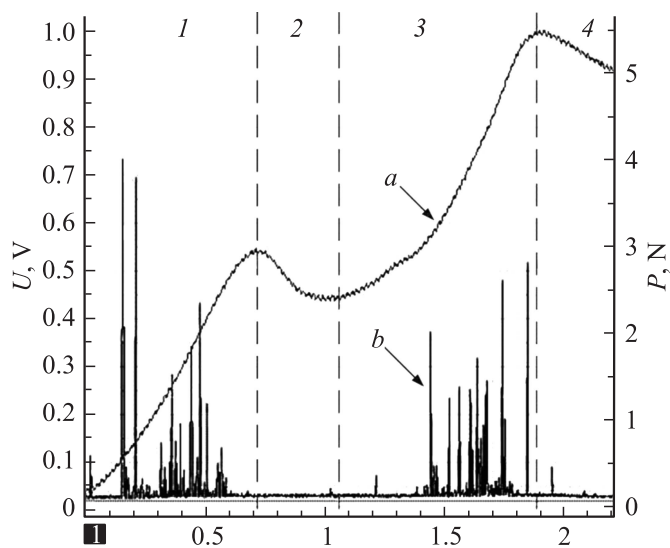
Микроскопические исследования поверхности образцов в зоне индентирования показали, что возле отпечатка алмазной пирамидки возникают клиновидные двойниковые прослойки системы  $(10\bar{1}2)$  длиной  $3\text{--}50 \mu\text{m}$ . Одновременно с двойниками на поверхности деформированного титана образуются линии скольжения (рис. 1, *a*) [6].

Химическое травление титана выявило неоднородность распределения напряжений в зоне аккомодации, образованной вдоль границы двойниковой прослойки (рис. 1, *b*). При этом в материнской части кристалла, не затронутой процессом двойникования, таких неоднородностей не наблюдается. Это дает возможность предполагать прохождение мощных процессов, связанных с возникновением, перемещением и образованием скоплений дефектов в зоне аккомодации.

Для непосредственной оценки вклада процесса двойникования и перемещения дислокаций в зоне аккомодации в суммарную пластическую деформацию были проанализированы результаты регистрации



**Рис. 1.** Изображения, полученные с помощью сканирующего зондового микроскопа, поверхности титана в зоне образовавшегося двойника после индентирования (*a*), травления (*b*). *1* — двойниковая прослойка, *2* — плоскость аккомодации.



**Рис. 2.** График зависимости нагрузки от времени внедрения индентора (*a*) и регистрируемые при этом сигналы АЭ (*b*).

сигналов акустической эмиссии и деформационные кривые, полученные при индентировании образцов поликристаллического титана в зерна с ориентацией (0001).

На рис. 2 приведены типичные для проведенного эксперимента результаты регистрации сигналов акустической эмиссии и деформационной кривой, синхронизированных по времени. Из приведенных результатов следует, что на участке 1 и 3 в момент деформационного упрочнения наблюдается высокая активность акустической эмиссии с большой амплитудой регистрируемых сигналов. На участках 2 и 4, соответствующих спаду деформационного упрочнения, сигналов акустической эмиссии практически не наблюдается.

Известно, что по амплитуде сигналов АЭ можно судить о природе их источников [7]. Так, например, двойникование является высокоамплитудным источником акустической эмиссии, а скольжение, объединение, торможение дислокаций или работа источника Франка–Рида — низкоамплитудным [8,9].

Из приведенных результатов исследования следует, что повышение напряжений на участке 1, 3 (рис. 2) и, как следствие этого, деформационное упрочнение кристалла происходят за счет образования и роста двойниковых прослоек, что подтверждается высокими амплитудами сигналов АЭ.

Релаксация напряжений, приводящая к спаду деформационного упрочнения, происходит на участках 2 и 4 за счет образования и скольжения дислокаций, характеризующихся низкоамплитудной АЭ. С учетом результатов исследования структуры в области отпечатка алмазной пирамидки можно с большой степенью достоверности предположить, что образование и движение дислокаций, ответственных за разупрочнение, происходит именно в зонах аккомодации.

Экспериментально подтверждается, что деформационное упрочнение в реальном поликристаллическом металле с гексагональной плотноупакованной решеткой происходит за счет образования и роста двойниковых прослоек, а скольжение, происходящее в зонах аккомодации, осуществляет релаксацию напряжений.

## Список литературы

- [1] *Chuna Y.B., Yu S.H., Semiatin S.L., Hwang S.K.* // Materials Science and Engineering. 2005. V. 398. P. 209–219.
- [2] *Класен-Неклюдова М.В.* Механическое двойникование кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 261 с.
- [3] *Башмаков В.И., Чикова Т.С.* // ДАН СССР. 1981. Т. 259. № 3. С. 582–583.
- [4] *Савченко В.С.* // Письма в ЖТФ. 1998. Т. 24. № 9. С. 43–49.
- [5] *Федоров В.А., Тялин Ю.И., Тялина В.А.* Дислокационные механизмы разрушения двойникующихся материалов. М.: Изд-во Машиностроение-1, 2004. 336 с.
- [6] *Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кунгурцев М.С., Гончаров И.Ю., Неклюдов И.М., Волчок О.И.* // МТМ. 2010. № 8. С. 25–29.
- [7] *Стоев П.И., Папиров И.И.* // Вопросы атомной науки и техники. 2007. № 4. Сер.: Вакуум, чистые материалы, сверхпроводники (16). С. 184–191.
- [8] *Поллок А.* // Металлы (METALS HANDBOOK). ASM International, 9-е изд-е. 1989. Т. 17. С. 278–294.
- [9] *Марьин Б.Н., Семашко Н.А., Шпорт В.И.* // Акустическая эмиссия в экспериментальном материаловедении. М.: Машиностроение, 2002. 240 с.