

УДК 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1042-1045

## ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПРИЛОЖЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ПО ОТНОШЕНИЮ К ОСИ Z БАЗОВОЙ ПЛОСКОСТИ $Ti_\alpha$ НА ПРОЦЕСС МЕХАНИЧЕСКОГО ДВОЙНИКОВАНИЯ

© Н.В. Камышанченко, И.С. Никулин, А.В. Гальцев,  
В.А. Беленко, И.Н. Гальцева, М.В. Мишунин

Белгородский государственный университет, г. Белгород, Российская Федерация,  
e-mail: Kamysh@bsu.edu.ru

Была установлена зависимость образования механических двойников от величины угла отклонения направления приложенной нагрузки от оси Z базовой плоскости в  $Ti_\alpha$  марки ВТ1-0 при комнатной температуре.

*Ключевые слова:* титан; двойникование; акустическая эмиссия; дефекты.

### ВВЕДЕНИЕ

В качестве материала исследования был выбран технически чистый титан марки ВТ1-0.

Процесс двойникования в ГПУ металлах зависит от таких факторов, как температура, величина и скорость нагружения. Все гексагональные металлы двойниуются по плоскостям  $\{10\bar{1}2\}$ , но  $Ti_\alpha$ , Zr, Re, Mg, В еще по  $\{10\bar{1}1\}$ , а  $Ti_\alpha$  и Zr, кроме того, и по  $\{10\bar{1}3\}$ . То есть  $Ti_\alpha$  отличается наибольшим числом систем двойникования. Поскольку у гексагональных металлов отношение осей ( $c/a = 1,586$ ) отличается от теоретического значения для металлов плотной упаковки ( $c/a = 1,63$ ), то в решетке нет кристаллической плоскости, зеркальное отражение от которой получилось бы неким кристаллографическим сдвигом. Однако однородный сдвиг переводит в новые узлы не все атомы элементарной ячейки: некоторым нужны еще малые смещения к узлам [1]. Поэтому в  $Ti_\alpha$  надо еще осуществить процедуру деформирования, чтобы создать условия для совпадения узлов [2–3]. Поскольку в гексагональных металлах плоскости двойникования не совпадают с плоскостью скольжения, то двойникование облегчает течение и составляет главную роль в широком диапазоне деформаций. При холодной деформации  $Ti_\alpha$  в начале действуют только системы скольжения с вектором Бюргерса  $\mathbf{a}$ . Но размер кристалла вдоль оси  $c$  сдвигами вдоль вектора  $\mathbf{a}$  изменить нельзя, поэтому сразу происходит двойникование. Пропорции двойникования и скольжения сильно зависят от температуры деформации и ориентировки напряжения по отношению к оси  $c$  [4].

В идеальной гексагональной решетке плоскость базиса (0001) является плоскостью плотной упаковки, но в т. н. «сплюсненной» решетке  $Ti_\alpha$ , Zr, Hf, где  $c/a = 1,58$ , доминирующее скольжение происходит по плоскости призмы  $\{10\bar{1}02\}$ , а при нагреве появляется и базисное.

Исходя из особенностей зарождения двойников в  $Ti_\alpha$ , была поставлена цель: исследовать этот процесс в зависимости от величины нагружения и ориентации вектора нагружения  $\mathbf{s}$  к положению базисной плоскости (0001).

### МАТЕРИАЛ, МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Исследованию подвергался технически чистый титан ВТ1-0 – ГОСТ 19807-91. После термомеханической обработки [5] из полученных полосовых заготовок электроэрозионным способом на установке AQ300L вырезались образцы  $10 \times 10 \times 1,5$  мм и подвергались дальнейшей обработке [6]. Для электронномикроскопических исследований изготавливались фольги толщиной до 0,02 мкм.

Для выбора места индентирования предварительно с помощью методики EBSD-анализа формировалась карта роториентировок зерен, и с помощью углов Эйлера определялись положения кристаллической решетки в каждом зерне по отношению к направлению нагружения (рис. 1) [6].

Для регистрации акустической эмиссии (АЭ) образцы соединяли с пьезоэлектрическим датчиком установки «МалахитАС15А/12» и устанавливали на предметный столик динамического ультразвукового твердомера «Shimadzu DUN 211S».

В процессе проведения эксперимента одновременно регистрировалась энергия сигналов АЭ, возникающая в результате проникновения пирамидки в выбранный кристалл, в зависимости от глубины проникновения пирамидки в кристалл (мкм) и длительности этого процесса.

Исследования проводились при комнатной температуре, и активирование процесса двойникования осуществлялось воздействием постоянной нагрузки в 500 мН вдоль оси  $c$  на индентор ультразвукового твердомера.

После прекращения перемещения индентора было обнаружено, что наличие и количество механических

двойников вокруг отпечатка пирамидки в зернах с базовой плоскостью (0001) различное. Различный характер изменения сигнала во времени и величины АЭ в процессе нагружения и величины погружения пирамидки в зерно. Вокруг отпечатка образуется не только разное количество механических двойников, но иногда отмечается их отсутствие, что наблюдалось с помощью просвечивающего микроскопа "JEM-2100". Полученные результаты [7] однозначно обосновывались наличием в зернах отличных друг от друга внутренних напряжений, возникших в результате наличия дефектов и сохранившихся в результате неполного отжига в процессе подготовки образцов к эксперименту и других причин. И это не противоречило основным теоретическим положениям о дефектах кристаллической решетки и влиянии их на внутренние напряжения.

Применение более точных методов направления приложенного напряжения по отношению плоскости (0001) с помощью углов Эйлера позволило определить истинное положение решетки по отношению к направлению приложенного напряжения. Положение решетки, полученное методом дифракции обратно рассеянных электронов с использованием растрового микроскопа "OIM Analysis 5.2", и вектора направления при-

ложенной внешней нагрузки по отношению к базовой плоскости решетки, определенные с помощью углов Эйлера, представлены в табл. 1. Величина АЭ, выделенная в процессе индентирования, как следует из полученных данных эксперимента, зависит от угла прило-

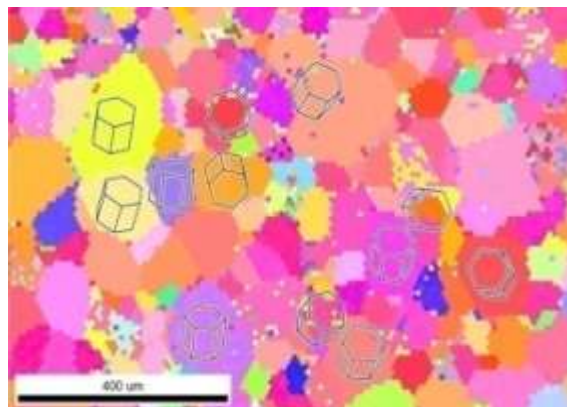


Рис. 1. Результаты EBSD-анализа исследуемого образца титана

Таблица 1

Ориентация решетки по отношению к базовой плоскости

№ укола	Углы, °	Энергия максимальная, мкВ <sup>2</sup> /мкс	Снимок укола	Ориентация решетки
1	350.1, 48.8 151.5	10 <sup>4</sup>		
2	350.7, 48.9 151.3	10 <sup>4</sup>		
3	350.6, 48.5 151.5	10 <sup>4</sup>		
4	41.2, 17.8, 133.9	10 <sup>9</sup>		
5	41.0, 17.4, 133.7	10 <sup>8</sup>		
6	41.5, 17.7, 133.3	10 <sup>8</sup>		

жения напряжений к плоскости (0001) исследуемого кристалла.

Тонкие продолговатые двойники с уменьшением угла отклонения по отношению плоскости (0001) к оси Z положения индентора становятся более выражены за пределами отпечатка и количество их увеличивается (табл. 1, № 4, 5, 6). С увлечением угла отклонения от вертикальной оси Z количество двойников за пределами отпечатка заметно уменьшается или совсем не выходят. АЭ так же уменьшается по величине.

Установлено, что при комнатной температуре деформации вдоль оси индентирования поликристаллического титана сжатием зарождение двойниковых прослоек происходит при весьма умеренных напряжениях:  $\tau/G = 0,005$ , и двойники занимают существенный объем кристалла [8]. И если при этом одновременно протекает процесс скольжения, то двойник растет в толщину вследствие поглощения его поверхностью дислокаций. Об этом свидетельствуют данные, представленные в табл. 1 (п. 1, 2, 3). Вышедший за пределы отпечатка алмазной пирамидки двойник короткий, но с утолщенной величиной в устье (табл. 1 п. 3). Однако наличие таких дислокаций незначительно. Такой двойник может образовываться от реакции между полными дислокациями путем испускания их в матрицу или в двойник при движении [3; 9]. В отличие от таких двойников, образованных при заметных отклонениях направления индентора в кристалл от приложения плоскости (0001), с уменьшением угла отклонения образуются тонкие двойники.

Обнаружено, что такой тонкий двойник окружен по периметру сплетениями дислокаций в матрице. Испускаемые двойником полные дислокации находили электронно-микроскопическим способом [10].

Подобные двойники – без двойнивающих дислокаций на фронте – легко растут в длину, но очень трудно –

в толщину. Для роста в толщину нужна термическая активация. Пропорции двойникового и скольжения сильно зависят от деформации и ориентации направления действия нагрузки и положения плоскости (0001) [11].

Однако в гексагональных металлах плоскости двойникового при больших напряжениях не совпадают с плоскостями скольжения. И, как следствие, роль скольжения незначительно влияет на развитие двойникового, и поэтому двойникование облегчает течение деформации, что отражается на величине выделенной АЭ (табл. 1, № 4, 5, 6).

Но такой процесс может существовать, как следует из экспериментальных данных, при незначительных отклонениях вектора нагрузки на индентор от вертикальной оси «Z».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 511 с.
2. Tog M.H. // Met. Trans. A. 1981. V. 12. № 3. P. 409.
3. Song S.G., Gray G.T. // ActaMet. Mat. 1995. V. 43. № 6. P. 2325-2339.
4. Mullins S., Patchertt B.M. // Met. Trans. A. 1981. V. 12. № 5. P. 975.
5. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кунгурцев М.С., Гончаров И.Ю., Неклюдов И.М., Волчок О.И. О двойниковании титана BT1-0 после полного отжига // МТГОМ. 2010. № 8. С. 25-29.
6. Камышанченко Н.В., Никулин И.С., Кузнецов Д.П., Кунгурцев М.С., Неклюдов И.М., Волчок О.И. Особенности образования механических двойников в закаленном титане // ФХОМ. 2010. № 4. С. 84-89.
7. Классен-Неклюдова М.В. Механическое двойникование кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 261 с.
8. Mullins S., Patchertt B.M. // Met. Trans. A. 1981. V. 12. № 5. P. 353.
9. Serra A. // Phil. Mag. A. 1996. V. 73. № 2. P. 333.
10. Lay S., Nouet G. // Phil. Mag. A. 1995. V. 72. № 3. P. 603.
11. Штремель М.А. Прочность сплавов. Ч. II. Деформация. М.: МИСиС, 1997. 527 с.

Поступила в редакцию 10 апреля 2016 г.

UDC 539.3

DOI: 10.20310/1810-0198-2016-21-3-1042-1045

### THE DEVIATION DIRECTION EFFECT OF THE APPLIED VOLTAGE WITH RESPECT TO THE Z-AXIS OF THE REFERENCE PLANE $Ti_{\alpha}$ TO MECHANICAL TWINNING PROCESS

© N.V. Kamyshanchenko, I.S. Nikulin, A.V. Galtsev,  
V.A. Belenko, I.N. Galtseva, M.V. Mishunin

Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation,  
e-mail: Kamysh@bsu.edu.ru

The dependence of mechanical counterparts on the angle of deviation from the direction of the applied load z-axis in the reference plane  $Ti_{\alpha}$  with standard BT1-0 at room temperature has been identified.

*Key words:* titanium; twinning; acoustic emission; defects.

#### REFERENCES

1. Tsvikker U. *Titan i ego splavy*. Moscow, Metallurgy Publ., 1979. 511 p.
2. Tog M.H. *Met. Trans. A.*, 1981, vol. 12, no. 3, p. 409.
3. Song S.G., Gray G.T. *ActaMet. Mat.*, 1995, vol. 43, no. 6, pp. 2325-2339.

4. Mullins S., Patchert B.M. *Met.Trans. A.*, 1981, vol. 12, no. 5, p. 975.
5. Kamyshanchenko N.V., Nikulin I.S., Kungurtsev M.S., Goncharov I.Yu., Neklyudov I.M., Volchok O.I. O dvoynikovanii titana VT1-0 posle polnogo otzhiga. *Metallovedenie. Termicheskaya obrabotka metallov – Metal Science and Heat Treatment*, 2010, no. 8, pp. 25-29.
6. Kamyshanchenko N.V., Nikulin I.S., Kuznetsov D.P., Kungurtsev M.S., Neklyudov I.M., Volchok O.I. Osobennosti obrazovaniya mekhanicheskikh dvoynikov v zakalennom titane. *Fizika i khimiya obrabotki materialov – Physics and Chemistry of Materials Treatment*, 2010. no. 4, pp. 84-89.
7. Klassen-Neklyudova M.V. *Mekhanicheskoe dvoynikovanie kristallov*. Moscow, AN SSSR Publ., 1960. 261 p.
8. Mullins S., Patchert B.M. *Met. Trans. A.* 1981, vol. 12, no. 5, p. 353.
9. Serra A. *Philosophical Magazine A*, 1996, vol. 73, no. 2, p. 333.
10. Lay S., Nouet G. *Philosophical Magazine A*, 1995, vol. 72, no. 3, p. 603.
11. Shtremel' M.A. *Prochnost' splavov*. Ch. II. Deformatsiya. Moscow, Publishing House of National University of Science and Technology "MISIS", 1997. 527 p.

Received 10 April 2016

Камышанченко Николай Васильевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры общей и прикладной физики, e-mail: Kamysh@bsu.edu.ru

Kamyshanchenko Nikolay Vasilevich, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor of General and Applied Physics Department, e-mail: Kamysh@bsu.edu.ru

Никулин Иван Сергеевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, e-mail: nikulin@bsu.edu.ru

Nikulin Ivan Sergeevich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Senior Research Worker, e-mail: nikulin@bsu.edu.ru

Гальцев Александр Владимирович, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры общей и прикладной физики, e-mail: galtsev@bsu.edu.ru

Galtsev Aleksander Vladimirovich, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor of General and Applied Physics Department, e-mail: galtsev@bsu.edu.ru

Беленко Владимир Алексеевич, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, кандидат физико-математических наук, доцент, начальник управления заочного обучения и электронных образовательных технологий, e-mail: vbelenko@bsu.edu.ru

Belenko Vladimir Alekseevich, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Candidate of Physics and Mathematics, Associate Professor, Head of Distance Learning and E-learning Technologies Department, e-mail: vbelenko@bsu.edu.ru

Гальцева Ирина Николаевна, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, старший преподаватель кафедры информатики, естественнонаучных дисциплин и методик преподавания, e-mail: galtseva\_i@bsu.edu.ru

Galtseva Irina Nikolaevna, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Senior Lecturer of Computer Science, Sciences and Teaching Methods Department, e-mail: galtseva\_i@bsu.edu.ru

Мишунин Максим Вадимович, Белгородский государственный национальный исследовательский университет, г. Белгород, Российская Федерация, аспирант, e-mail: maks\_mish@mail.ru

Mishunin Maksim Vadimovich, Belgorod National Research University, Belgorod, Russian Federation, Post-graduate Student, e-mail: maks\_mish@mail.ru