

## Оригинальная статья / Original article

УДК 519.63

## Зависимость развития двойникования в Ti от угла разориентировки

Н. В. Камышанченко<sup>1</sup>, М. В. Мишунин<sup>1</sup> ✉, В. С. Захвалинский<sup>1</sup>,  
А. В. Гальцев<sup>1</sup>, В. А. Беленко<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Белгородский государственный национальный исследовательский университет  
ул. Победы, 85, г. Белгород, 308015, Российская Федерация

✉ e-mail: maks\_mish@mail.ru

### Резюме

**Целью** настоящих исследований является изучение влияния угла разориентировки между вектором приложенного внешнего напряжения на алмазную пирамидку и нормалью С базовой плоскости (0001) титана на развитие механических двойников и их характеристики.

**Методология.** В качестве исследования был выбран титан марки VT1-0. В результате технологической обработки сформировалась структура со средним размером кристаллов 8 мкм. Деформационное индентирование осуществлялось при помощи ультрамикротвердомера Shimadzu Din 211S. Для регистрации АЭ использовали прибор «Малахит АС – 15А». Выбор кристаллов для индентирования осуществлялся с помощью методики автоматического анализа EBSD. Эксперимент осуществлен с использованием растрового электронного микроскопа «LEO – 440» при ускоряющем напряжении 20 кВ.

**Результаты.** В работе представлены экспериментальные результаты состояния механических двойников, образованных в кристалле воздействием внешней нагрузки на алмазную пирамидку под разными углами по отношению к оси «С» базовой плоскости (0001). Дается физическое объяснение и математическая интерпретация образования механических двойниковых прослоек. Установлена зависимость выделения АЭ от угла расхождения между вектором приложенной нагрузки и осью «С» базовой плоскости (0001).

**Заключение.** Механические двойники, зарождающиеся концентрированным напряжением при помощи внешней нагрузки на алмазную пирамидку, возникают и развиваются группами вдоль ребер пирамидки и на их пересечении, что связывается с особенностями индентора. Развитие физико-механических процессов в результате воздействия внешней концентрированной нагрузки фиксируется при помощи АЭ, позволяющая разделить дефекты по величине затраченной энергии на их образование и выделение сигнала в виде АЭ. Скрытые внутренние дефекты кристалла, являющиеся концентраторами напряжений, не позволяют точно определить место и время образования двойника. Проведенные эксперименты на титане марки VT1-0 позволили установить зависимость  $F_{лок}$ , выраженную через АЭ, от угла разориентировки.

**Ключевые слова:** титан; двойникование; механический двойник; угол расхождения; акустическая эмиссия; концентратор напряжения.

**Конфликт интересов:** Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Для цитирования:** Зависимость развития двойникования в Ti от угла разориентировки / Н. В. Камышанченко, М. В. Мишунин, В. С. Захвалинский, А. В. Гальцев, В. А. Беленко // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2020. Т. 10, № 4. С. 108–121.

Поступила в редакцию 29.10.2020

Подписана в печать 20.11.2020

Опубликована 18.12.2020

© Камышанченко Н. В., Мишунин М. В., Захвалинский В. С., Гальцев А. В., Беленко В. А., 2020

## Dependence of the Development of Twinning in Ti on the Misorientation Angle

Nikolai V. Kamyshanchenko<sup>1</sup>, Maksim V. Mishunin<sup>1</sup> ✉, Vasilii S. Zakhvalinskii<sup>1</sup>,  
Aleksandr V. Gal'tsev<sup>1</sup>, Vladimir A. Belenko<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Belgorod National Research University  
85 Pobedy st., Belgorod 308015, Russian Federation

✉ e-mail: maks\_mish@mail.ru

### Abstract

**The purpose** of the present studies is to study the influence of the misorientation angle between the applied external stress vector on the diamond pyramid and the normal *C* of the base plane (0001) of titanium on the development of mechanical twins and their characteristics.

**Methodology.** Ti of BT1-0 was chosen for the study. The result of technological processing, is the structure with an average crystal size of 8 μm. Deformation indentation was carried out using Shimadzu Din 211S ultra-microdurometer. In order to register AE, the "Malachite AC-15A". In order to register AE, the sample was connected to a piezoelectric sensor of "AS-15A" device and then it was installed on the desk of the ultra-microdurometer. The applied experimental scheme allows to record the depth of the diamond pyramid penetration, the maximum energy *E<sub>max</sub>* of AE signals, the immersion time at the same value of the applied load on the indenter at room temperature simultaneously. The choice of crystals for indentation was carried out using the technique of diffraction pattern automatic analysis generated by backwardly scattered electrons - EBSD (electron backscatter diffraction). The experiment was carried out using the scanning electron microscope LEO-440 with the accelerating voltage of 20 kV

**Results.** The article demonstrates experimental results of mechanical twin states formed in a crystal by the action of an external load on a diamond pyramid at different angles with respect to the "C" axis of the reference plane (0001). The physical explanation and the mathematical interpretation of mechanical twin strip formation are presented. The dependence of AE emission on the divergence angle between the vector of the applied load and "C" axis of the reference plane (0001) was established.

**Conclusion.** Mechanical twins, which are generated by concentrated stress with the help of an external load on the diamond pyramid, arise and develop in groups along the edges of the pyramid and at their intersection, which is associated with the features of the indenter. The development of physical and mechanical processes as a result of the impact of an external concentrated load is recorded using AE, which allows us to divide defects by the amount of energy spent on their formation and the release of a signal in the form of AE. Hidden internal defects of the crystal, which are stress concentrators, do not allow us to accurately determine the place and time of the formation of the double. The experiments carried out on VT1-0 grade titanium allowed us to establish the dependence of *F<sub>lok</sub>*, expressed in terms of AE, on the disorientation angle.

**Keywords:** titanium; twinning; mechanical twins; divergence angle; acoustic emission; stress concentrator.

**Conflict of interest:** The authors declares the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

**For citation:** Kamyshanchenko N. V., Mishunin M. V., Zakhvalinskii V. S., Gal'tsev A. V., Belenko V. A. Dependence of the Development of Twinning in Ti on the Misorientation Angle. *Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii = Proceedings of the Southwest State University. Series: Engineering and Technologie.* 2020; 10(4): 108–121. (In Russ.)

Received 29.10.2020

Accepted 20.11.2020

Published 18.12.2020

\*\*\*

## Введение

Появление двойниковых прослоек в металле под воздействием нагрузки описано во многих теоретических и экспериментальных работах. Однако механизм возникновения двойникового явления является наименее изученным. В процессе пластической деформации в металлах возникают локализованные сдвиговые процессы, которые называются двойникованием, это сдвиговые процессы происходят в локализованном и ограниченном объеме материала. В отличие от процесса скольжения двойникование ограничено одной кристаллографической плоскостью, этот процесс также является двумерным.

В металлах с гранцентрированной кубической (ГЦК) структурой одним из наиболее распространенных видов деформации является двойникование, т. к. в таких металлах содержится большое число возможных систем скольжения. Однако оно происходит и в металлах с гексагональной плотноупакованной (ГПУ) структурой, в которых возможности скольжения ограничены. На процесс двойникования в ГПУ-структурах влияет соотношение  $c/a$ , изменяющееся в различных металлах в интервале 1,56...1,886 [1], что создает дополнительные сложности в проведении эксперимента. Одним из возможных факторов, создающих условия для зарождения двойника, является наличие концентраторов напряжения в объеме кристалла.

На начальном этапе изучения двойникового явления была обоснована необходимость создания сосредоточенной внешней нагрузки [2]. Установлено, что такое напряжение может быть создано при помощи внешней нагрузки на алмазную пирамидку, активность проявления стабильных концентраторов напряжений при этом не зависит от условий воздействия нагружения на кристалл, характера деформирующих напряжений и определяется только особенностью пирамидки. Появление двойников после начала действия внешнего напряжения зависит от пластических свойств металла, влияющих на глубину погружения пирамидки в кристалл [3].

Целью настоящих исследований является изучение влияния угла разориентировки между вектором приложенного внешнего напряжения на алмазную пирамидку и нормалью «С» базовой плоскости (0001) титана на развитие механических двойников и их характеристики [1; 4; 5].

## Материалы и методы

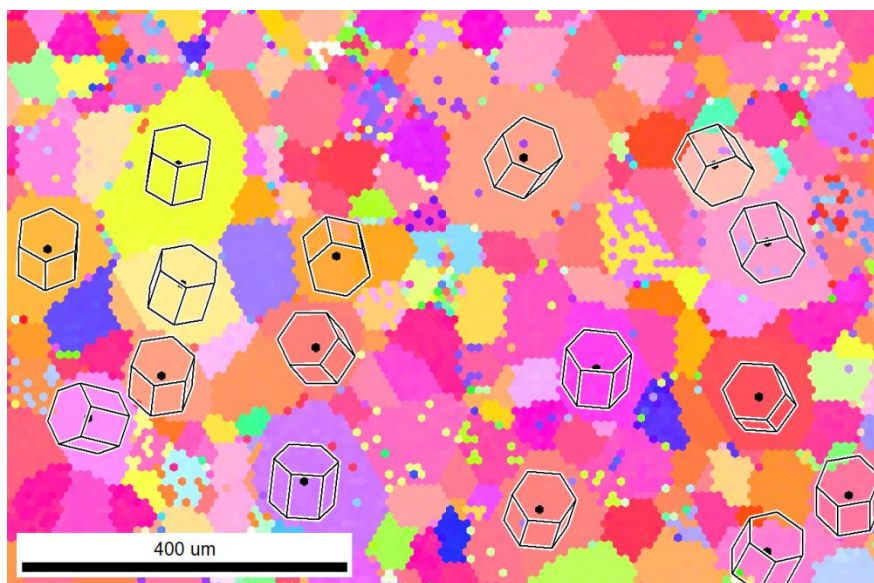
В качестве исследования был выбран титан марки ВТ1-0. В результате технологической обработки [6; 7] сформировалась структура со средним размером кристаллов 8 мкм. Деформационное индентирование производилось на динамическом ультрамикротвердомере Shimadzu Din 211S, позволяющем достоверно имитировать реальные условия зарождения двойников

под действием внешней нагрузки. При достижении контакта кристалла с кончиком пирамидки действуют максимальные напряжения, равные модулю сдвига  $G$  [8]. В процессе проникновения пирамидки вглубь образца за контуром отпечатка образуется сильно неоднородно убывающее обратно пропорционально квадрату расстояния упругих напряжений, способствующее развитию АЭ [9].

Для регистрации АЭ использовали прибор «Малахит АС – 15А». Для регистрации АЭ образец соединялся с пьезоэлектрическим датчиком с последующей установкой его на предметном столике ультрамикротвердомера. Примененная схема эксперимента позволяет одновременно регистрировать глубину проникновения алмазной пирамидки ( $H$ ), максимальную энергию ( $E_{\max}$ ) сигналов АЭ, время погружения ( $T$ ) при одном и том же значении при-

ложенной нагрузки на индентор при комнатной температуре.

Выбор кристаллов для индентирования осуществлялся с помощью методики автоматического анализа картин дифракции, формируемых обратно рассеянными электронами EBSD [6] с использованием программного обеспечения [7]. Эксперимент осуществлен с использованием растрового электронного микроскопа «LEO – 440» при ускоряющем напряжении 20 кВ. С помощью такой методики формировалась карта положения зерен в образце и определялись углы Эйлера между положением оси «С» базовой плоскости выбранного кристалла и вектором приложенного напряжения (рис.1). Из рисунка 1 видно, что выделенные кристаллы ориентированы по отношению к горизонтальной плоскости под разными углами.



**Рис. 1.** Результаты EBSD-анализа исследуемого образца

**Fig. 1.** The results of EBSD analysis for the sample under study

Для более привычного представления положения вектора нагрузки по отношению к оси  $C$  и угла между ними был проведен перерасчет углов Эйлера в декартовую систему координат в индексы Миллера– Браве кристаллических плоскостей. Поворотные элементы симметрии в кристалле характеризовались матрицей ортогонального преобразования  $A$ , подчиняющейся, как известно, условию [10; 11]:

$$\sum_{i=1}^3 a_{ik}a_{il} = \delta_{kl}, \quad k, l = 1, 2, 3, \quad (1)$$

где  $a_{ik}$  – элементы матрицы  $A$ ;  $\delta_{kl}$  – символ Кронекера, равный 1 при  $k = l$ , 0 при  $k \neq l$ . Если поворот задан углами Эйлера  $\varphi_1, \Phi, \varphi_2$  в системе Бунге, то индексы Миллера ( $hkl$ ) кристаллографической плоскости определяются соотношениями:

$$h = n \sin \Phi \cdot \sin \varphi_2;$$

$$k = n \sin \Phi \cdot \cos \varphi_2; \quad l = n \cos \Phi,$$

где  $n$  – целое число.

Для гексагональной сингонии [6] угол между нормальными к плоскости зерна и кристаллического образца можно рассчитать по формуле

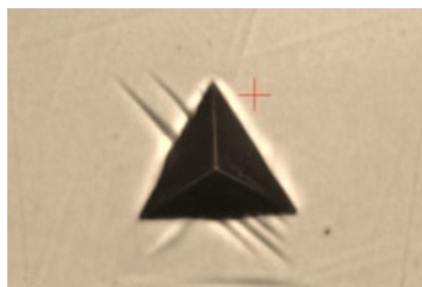
$$\alpha = \arccos \left( \frac{h}{a \cdot \sqrt{\frac{4(h^2+hk+k^2)}{3a^2} + \frac{l^2}{c^2}}} \right), \quad (2)$$

где  $a, c$  – параметры гексагональной решетки.

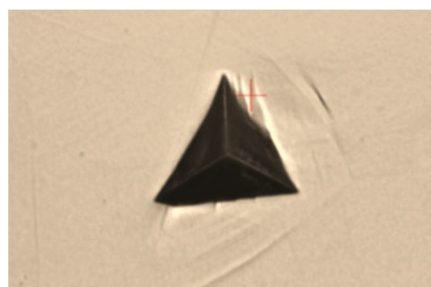
## Результаты и их обсуждение

Состояния остаточных механических двойников по кромке отпечатка алмазной пирамидки отличаются характерными особенностями их расположения, а именно: двойники, как правило, сохраняются группами вдоль края ребра и в местах пересечения граней призмы с различными длинами ( $l$ ), толщиной ( $h$ ) и непредсказуемым количеством. Кроме того, существуют области предпочтительного их расположения вне отпечатка (рис. 2).

Наличие двойниковых прослоек вне образованной лунки свидетельствует об участии в зарождении двойникового гетерогенных концентраторов. Такие двойники располагаются, как правило, поодиночке и развиваются в различных кристаллографических направлениях (рис. 2, б).



а)



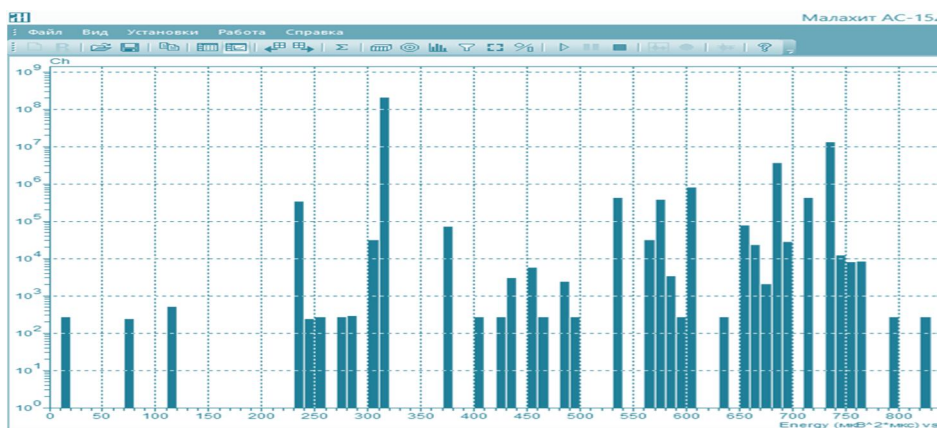
б)

**Рис. 2.** Остаточные двойники в  $\alpha$ -титане при однократном индентировании (а) и образовании двойников в результате действия гетерогенных концентраторов, отмеченных стрелками (б)

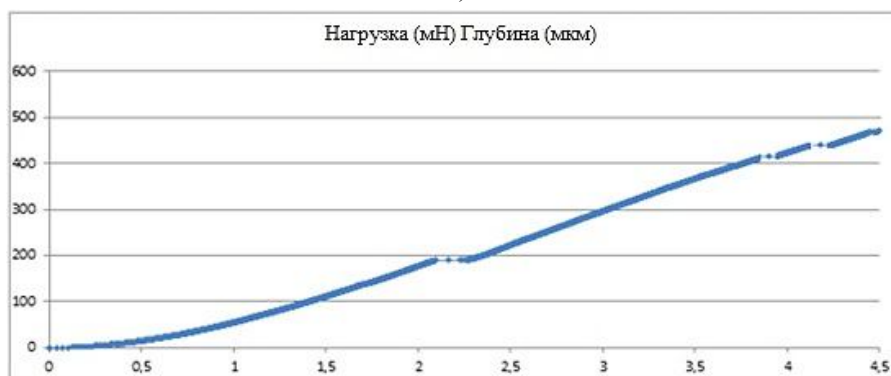
**Fig. 2.** Residual twins in titanium for single indentation (а) and the formation of twins as the result of heterogeneous concentrator action marked with arrows (б)

Возникновение АЭ (рис. 3, а) и ее фиксация осуществляется только после проникновения алмазной пирамидки вглубь образца (рис. 3, б). Дальнейшее погружение алмазной пирамидки характеризуется неравномерной скоростью проникновения вглубь образца и

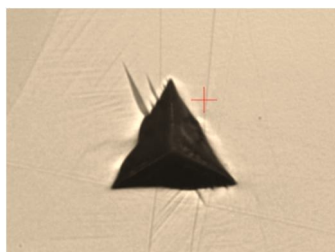
выделением АЭ  $E_{max}$  в пределах от  $10^2$  до  $10^9$  мкВ·мкс (рис. 3, а). АЭ, выделяемая при нагружении на пирамидку под разными углами по отношению к оси С, характеризуется неравномерным распределением на всех этапах погружения.



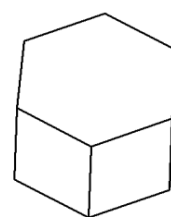
а)



б)



в)



г)

**Рис. 3.** Гистограмма распределения АЭ (а); кинетика погружения пирамидки в исследуемое зерно (б); состояние механических двойников вокруг отиска пирамидки после прекращения воздействия внешней нагрузки (в); положение зерна в образце, полученного при помощи EBSD-анализа (г)

**Fig. 3.** Histogram of AE distribution (а); the kinetics of the pyramid immersion into the grain under study (б); the state of mechanical twins around the pyramid imprint after the termination of the external load (в); the grain position in the sample obtained by EBSD analysis (г)

С увеличением выхода АЭ на графике перемещения алмазной пирамидки вглубь образца отмечается наличие площадки, которая растет по мере увеличения энергии АЭ и достигает максимального значения при  $E_{\max}^g$  (см. рис. 3, б).

Установлено, что количество, форма и размер двойников зависят от статической нагрузки и отражают способность кристаллической решетки к продвижению дислокационных ансамблей вглубь кристалла и генерированию новых дислокаций [12].

Наличие и количество разнообразных дефектов – фактор неконтролируемый, но он приводит к значительному разбросу размерных характеристик механических двойников в металле.

Образование двойникового зародыша происходит при условии, когда внешние напряжения, приложенные к материалу, превышают внутренние напряжения торможения двойниковой дислокации, действующие на источник дислокаций. На практике величина нагрузки, при которой происходит возникновение упругих механических двойников различна для каждого отдельного зерна и обусловлена наличием дефектов структуры в кристаллах. Объемная плотность гетерогенных структур и пластические свойства конкретного материала определяют количество таких концентраторов напряжений [13].

Все физические процессы, протекающие в металле под действием внешней механической нагрузки, такие как

двойникование, движение дислокаций, разрушение материала, вызывают АЭ-сигналы.

Линейные дефекты, к которым относятся дислокации, отличаются большей скоростью движения через кристаллическую решетку в сравнении с другими дефектами, а двойникование сопровождается локальным формоизменением со скоростью, близкой к звуковой для данного металла. Экспериментально установлена однозначная связь между появлением акустического сигнала и процессом двойникования [14; 15]. Пластическая деформация в твердых телах реализуется двумя основными типами – двойникованием и скольжением. Так как напряжение, необходимое для запуска процесса скольжения, меньше, чем напряжение, необходимое на образование двойников, скольжение является наиболее распространенным механизмом пластической деформации в металле [16].

Имеющиеся данные, полученные при исследовании металлов с ГПУ-структурой (цинк, кадмий, магний, титан, цирконий), позволяют утверждать, что процесс двойникования всегда идет после процесса скольжения, т. к. для начала двойникования необходимо наличие большого количества концентраторов напряжения [17].

В диапазоне применяемых в эксперименте нагрузок регистратор АЭ фиксирует равномерный по величине начальный акустический фон в пределах  $10^2$  мкВ·мкс. Однако скорость по-

гружения алмазной пирамидки неравномерная при стабильном увеличении внешней нагрузки (см. рис. 3).

Дальнейшее погружение пирамидки в зерно оказывает влияние на зарождение и увеличение новых центров торможения, какими являются дислокации и дислокационные комплексы, созданные внешней нагрузкой, обеспечивающие релаксацию напряжений. При этом сигналы АЭ по мере погружения неравномерно увеличиваются до  $10^4 \dots 10^6$  мкВ·мкс, что соответствует как увеличению плотности образованных дислокационных комплексов, так и возникновению более мощных структурных преобразований, к которым, прежде всего, относится скольжение. Двойники появляются только после того, как скольжение распространится на значительную часть кристалла [18]. Сигнал АЭ при этом принимает максимальное значение при данных условиях эксперимента и на графике кинетики погружения образуется ступенька, размеры которой зависят, очевидно, от условий двойникования.

Однако, как следует из результатов исследования клиновидных двойников, при их росте размеры двойников растут непропорционально нагрузке, приложенной к материалу (см. рис. 2, 3). Наблюдаемый на опыте разброс глубины погружений пирамидки, при котором зарождается упругий двойник, связан, по-видимому, с тем, что распределение концентраторов напряжений и их величина зависят от многих факторов,

которые изменяются от зерна к зерну. С проникновением вглубь образца алмазной пирамидки происходит возникновение новых стопоров, влияющих на периодичность и мощность образованных двойников. Однако несрелаксированные упругие напряжения дислокационного ансамбля по-прежнему обеспечивают прерывистое образование стопоров, а следовательно, и неравномерное увеличение двойников. Образование, рост, уменьшение и возможное исчезновение остаточных клиновидных прослоек в металлах обеспечивается упругими свойствами кристаллов [12]. Сумма упругих и неупругих сил равна нулю, действующая на скопление дислокаций, при внешней нагрузке обеспечивает равновесное состояние механического двойника:

$$F_{\text{упр}} + F_{\text{неупр}} = 0,$$

где  $F_{\text{упр}}$  – силы, созданные внешними неупругими полями дислокаций ансамбля;  $F_{\text{неупр}}$  – силы торможения, образованные структурой кристалла.

При взаимодействии двойника с дефектами происходит торможение его роста, которое влияет на неупругую составляющую сил, действующее на скопление дислокаций. Рост внешней нагрузки и торможения внутри кристалла приводит к увеличению  $F_{\text{упр}}$  и влияет на направление движения двойнивающих дислокаций в плоскости двойникования [19].

Этих физических объяснений недостаточно без учета условий развития



двойникового клина под сосредоточенной нагрузкой.

В процессе деформации невозможно определить интенсивность и знак полей упругих напряжений, появляющихся вследствие наличия различных дефектов в структуре кристалла. Равновесие клиновидной двойниковой прослойки под нагрузкой тогда можно описать уравнением

$$F_{\text{упр}} + F_{\text{неупр}} + F_{\text{лок}} = 0,$$

где  $F_{\text{лок}}$  – силы, действующие со стороны суммарного поля других напряжений на двойникующие дислокации ансамбля. Стоит отметить, что величина и направление этих сил способствуют неравномерному росту механических клиновидных двойников в материале под действием внешней нагрузки.

## Выводы

1. Механические двойники, зарождающиеся концентрированным напряжением при помощи внешней нагрузки на алмазную пирамидку, возникают и

развиваются группами вдоль ребер пирамидки и на их пересечении, что связывается с особенностями индентора.

2. Развитие физико-механических процессов в результате воздействия внешней концентрированной нагрузки фиксируется при помощи АЭ, позволяющая разделить дефекты по величине затраченной энергии на их образование и выделение сигнала в виде АЭ.

3. Скрытые внутренние дефекты кристалла, являющиеся концентраторами напряжений, не позволяют точно определить место и время образования двойника.

4. Наблюдаемый на опыте разброс значений нагрузки, при котором зарождается упругий двойник, связан, по видимому, с многими факторами, изменяющимися от зерна к зерну. Проведенные эксперименты на титане марки ВТ1-0 позволили установить зависимость  $F_{\text{лок}}$ , выраженную через АЭ, от угла разориентировки.

## Список литературы

1. Шульц Г. Металлофизика. М.: Мир, 1971. 503 с.
2. Гарбер Р. Н. Образование упругих двойников при двойниковании кальцита // Докл. АН СССР. 1938. Т. 21, № 5. С. 233–235.
3. Закономерности изменения микротвердости технически чистого титана, подверженного различному механико-термическому воздействию / Н. В. Камышанченко, И. С. Никулин, Д. П. Кузнецов, М. С. Кунгурцев, И. М. Неклюдов, О. И. Волчок // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика. 2010, Т.11, № 19. С. 78–87.

4. Классен-Неклюдова М. В. Механическое двойникование кристаллов. М.: Изд-во Акад. наук СССР, 1960. 261 с.

5. Цвиккер У. Титан и его сплавы: пер. с нем. М.: Metallургия, 1979. 512 с.

6. Adams B. L., Wright S. I., Kunze K. Orientation imaging: the emergence of a new microscopy // *Metallurgical Transactions*. 1993. Vol. 24A. P. 819–831.

7. 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 // *Вестник Тамбовского университета. Серия: Естественные и технические науки*. 2016. Т. 21, № 3. С. 1042–1045.

8. Акчурин М. Ш. Особенности деформирования кристаллов сосредоточенной нагрузкой: автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. М., 2001. 30 с.

9. Булычев С. А., Алехин В. П., Шоршоров М. Х. Исследование физико-механических свойств материалов в приповерхностных слоях и в микрообъемах методом непрерывного вдавливания индентора (обзор) // *Физика и химия обработки материалов*. 1979. № 5. С. 69–81.

10. Физическое материаловедение: в 6 т. Т. 1: Физика твердого тела / Г. Н. Елманов, А. С. Юровских, В. Н. Скрытний, Е. А. Смирнов, В. Н. Яльцев; под общ. ред. Б. А. Калина. М.: МИФИ, 2007. 636 с.

11. Лобанов М. Л., Юровских А. С., Русаков Н. Н. Методы исследования текстур в материалах. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2014. 115 с.

12. Zhang R. Y., Daymond M. R., Holt R. A. A finite element model of deformation twinning in zirconium // *Materials Science and Engineering*. 2008. Vol. A 473. P. 139–146.

13. Structure and stresses in a system of two mechanical twins in titanium / I. S. Nikulin, V. M. Beresnev, D. V. Horokh, V. G. Glebovsky, T. B. Nikulicheva, A. S. Kurbankin, M. V. Mishunin, V. B. Nikulichev, A. N. Eliseev, D. A. Kolesnikov, Yu. V. Suhorukova, N. S. Atamanichenko, A. A. Klenin, T. A. Erina // *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2018. Vol. 10, no. 6. P. 06047-1–06047-3.

14. Синхронная регистрация перемещения дислокаций и генерируемого или звукового излучения / В. С. Бойко, Р. Н. Гарбер, В. Ф. Кившик, Л. Ф. Кривенко // *Физика твердого тела*. 1975. № 5. С. 1541–1543.

15. Звуковое излучение двойниующих дислокаций / В. С. Бойко, Р. Н. Гарбер, Л. Ф. Кривенко, С. С. Кривуля // *Физика твердого тела*. 1970. Т. 12, № 6. С. 1753–1755.

16. Акустическое излучение при мартенситной реакции / Р. Н. Минц, В. П. Мелехин, И. Ю. Иевлев, В. В. Бухаленков // *Физика твердого тела*. 1982. Т. 14, № 5. С. 1582–1583.

17. Formation of nanostructures in commercial-purity titanium via cryorolling / S. V. Zharebtsov, G. S. Dyakonov, A. A. Salem, V. I. Sokolenko, G. A. Salishchev, S. L. Semiatin // *Acta Mater.* 2013. Vol. 61, no. 4. P. 1167–1178.

18. Солдатов В. П. О некоторых особенностях двойникования монокристаллов цинка при низких температурах // *Физика металлов и металловедение.* 1967. Т. 24, № 4. С. 744–753.

19. Experimental determination of preferential mechanisms of stress relaxation during deformation of hcp metals / N. V. Kamyshanchenko, I. S. Nikulin, E. S. Kungurtsev, M. S. Kungurtsev // *Technical Physics Letters.* 2013. Vol. 39, no. (5). P. 469–471.

### Reference

1. SHul'c G. *Metallofizika [Metallophysics]*. Moscow, Mir Publ., 1971– 503 p. (In Russ.)

2. Garber R. N. *Образование упругих двойников при двойниковании кальцита [Formation of elastic doubles during calcite twinning]*. *Dokl. AN SSSR = Dokl. USSR Academy of sciences*, 1938, vol. 21, no. 5, pp. 233–235. (In Russ.)

3. Kamyshanchenko N. V., Nikulin I. S., Kuznecov D. P., Kungurcev M. S., Neklyudov I. M., Volchok O. I. *Закономерности изменения микротвердости технического чистого титана, подверженного различному механико-термическому воздействию [Regularities of changes in the microhardness of the commercially pure titanium is exposed to various mechanical-thermal treatment]*. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Matematika. Fizika = Bulletin of Belgorod state University. Series: Mathematics. Physics*, 2010, vol. 11, no. 19, pp. 78–87. (In Russ.)

4. Klassen-Neklyudova M. V. *Механическое двойникование кристаллов [Mechanical twinning of crystals]*. Moscow, Academy of Sciences of the USSR Publ., 1960. 261 p. (In Russ.)

5. Zwicker U. *Титан и его сплавы [Titanium and its alloys]*. Moscow, Metallurgiya Publ., 1979. 512 p. (In Russ.)

6. Adams B. L., Wright S. I., Kunze K. *Orientation imaging: the emergence of a new microscopy*. *Metallurgical Transactions*, 1993, vol. 24A, pp. 819–831.

7. Kamyshanchenko N. V., Nikulin I. S., Gal'cev A. V., Belenko V. A., Gal'ceva I. N., Mishunin M. V. *Влияние отклонения направления приложенного напряжения по отношению к оси Z базовой плоскости  $Ti\alpha$  на процесс механического двойникования [The influence of the deviation of the direction of the applied voltage with respect to the Z axis of the base plane  $Ti\alpha$  on the process of mechanical twinning]*. *Vestnik Tambovskogo universi-*

*teta. Seriya: estestvennye i tekhnicheskie nauki = Bulletin of the Tambov University. Series: Natural and Technical Sciences*, 2016, vol. 21, no. 3, pp. 1042–1045. (In Russ.)

8. Akchurin M. Sh. Osobennosti deformirovaniya kristallov sosredotochennoj nagruzkoy. Avtoref. diss. dokt. fiz.-mat. nauk [Features of crystal deformation by concentrated load. Abstract diss. dr. of physics and mathematics sci.]. Moscow, 2001. 30 p. (In Russ.)

9. Bulychev S. A., Alekhin V. P., Shorshorov M. H. Issledovanie fiziko-mekhanicheskikh svojstv materialov v pripoverhnostnyh sloyah i v mikroob'emah metodom nepreryvnogo vdavlivaniya indentora (obzor) [Investigation of physical and mechanical properties of materials in near-surface layers and in micro-volumes by the method of continuous indentation of the indenter (review)]. *Fizika i himiya obrabotkia materialov = Physics and chemistry of materials processing*, 1979, no. 5, pp. 69–81. (In Russ.)

10. Elmanov G. N., Yurovskih A. S., Skrytnyj V. N., Smirnov E. A., YA'l'cev V. N. Fizicheskoe materialovedenie. T. 1: Fizika tverdogo tela [Physical science. Vol. 1: Solid state Physics]; ed. by B. A. Kalin. Moscow, MIFI Publ., 2007. 636 p. (In Russ.)

11. Lobanov M. L., Yurovskih A. S., Rusakov N. N. Metody issledovaniya tekstur v materialah [Methods of texture research in materials]. Ekaterinburg, Ural. Univ. Publ., 2014. 115 p. (In Russ.)

12. Zhang R. Y., Daymond M. R., Holt R. A. A finite element model of deformation twinning in zirconium. *Materials Science and Engineering*, 2008, vol. A 473, pp. 139–146.

13. Nikulin I. S., Beresnev V. M., Horokh D. V., Glebovsky V. G., Nikulicheva T. B., Kubankin A. S., Mishunin M. V., Nikulichev V. B., Eliseev A. N., Kolesnikov D. A., Suhorukova Yu. V., Atamanichenko N. S., Klenin A. A., Erina T. A. Structure and Stresses in a System of Two Mechanical Twins in Titanium. *Journal of Nano- and Electronic Physics*, 2018, vol. 10, no. 6, pp. 06047-1–06047-3.

14. Bojko V. S., Garber R. N., Kivshik V. F., Krivenko L. F. Sinhronnaya registraciya peremeshcheniya dislokacij i generiruemogo ili zvukovogo izlucheniya [Synchronous registration of dislocation displacement and generated or sound radiation]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 1975, no. 5, pp. 1541–1543. (In Russ.)

15. Bojko V. S., Garber R. N., Krivenko L. F., Krivulya S. S. Zvukovoe izluchenie dvojnukuyushchih dislokacij [Sound radiation of double dislocations]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 1970, vol. 12, no. 6, pp. 1753–1755. (In Russ.)

16. Minc R. N., Melekhin V. P., Ievlev I. Yu., Buhalenkov V. V. Akusticheskoe izluchenie pri martensitnoj reakcii [Acoustic radiation in a martensitic reaction]. *Fizika tverdogo tela = Solid State Physics*, 1982, vol. 14, no. 5, pp. 1582–1583. (In Russ.)

17. Zherebtsov S. V., Dyakonov G. S., Salem A. A., Sokolenko V. I., Salishchev G. A., Semiatin S. L. Formation of nanostructures in commercial-purity titanium via cryorolling. *Acta Mater.*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 1167–1178.

18. Soldatov V. P. O nekotorykh osobennostyakh dvojnikovaniya monokristallov cinka pri nizkikh temperaturah [On some features of twinning of single crystals of zinc at low temperatures]. *Fizika metallov i metallovedenie = Physics of metals and metallovedenie*, 1967, vol. 24, no. 4, pp. 744–753. (In Russ.)

19. Kamyshanchenko N. V., Nikulin I. S., Kungurtsev E. S., Kungurtsev M. S. Experimental Determination of preferential mechanisms of stress relaxation during deformation of Hcp metals. *Technical Physics Letters*, 2013, vol. 39, no. 5, pp. 469–471.

---

### Информация об авторах / Information about the Authors

**Камышанченко Николай Васильевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Российская Федерация  
e-mail: kamysh@bsu.edu.ru

**Nikolai V. Kamyshanchenko**, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of theoretical and experimental physics, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation  
e-mail: kamysh@bsu.edu.ru

**Мишунин Максим Вадимович**, научный сотрудник, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Российская Федерация,  
e-mail: maks\_mish@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-1843-0052

**Maksim V. Mishunin**, Researcher, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation,  
e-mail: maks\_mish@mail.ru  
ORCID: 0000-0003-1843-0052

**Захвалинский Василий Сергеевич**, доктор физико-математических наук, профессор кафедры теоретической и экспериментальной физики, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Российская Федерация,  
e-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru  
ORCID: 0000-0001-7055-8243

**Vasilii S. Zakhvalinskii**, Dr. of Sci. (Physics and Mathematics), Professor of the Department of Theoretical and Experimental Physics, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation  
e-mail: zakhvalinskii@bsu.edu.ru  
ORCID: 0000-0001-7055-8243

**Гальцев Александр Владимирович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Российская Федерация, e-mail: [galtsev@bsu.edu.ru](mailto:galtsev@bsu.edu.ru)

**Aleksandr V. Gal'tsev**, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Theoretical and Experimental physics, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation, e-mail: [galtsev@bsu.edu.ru](mailto:galtsev@bsu.edu.ru)

**Беленко Владимир Александрович**, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры прикладной информатики и информационных технологий, ФГАОУ ВО «Белгородский государственный национальный исследовательский университет», г. Белгород, Российская Федерация e-mail: [vbelenko@bsu.edu.ru](mailto:vbelenko@bsu.edu.ru)

**Vladimir A. Belenko**, Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor of the Department of Applied Informatics and Information Technology, Belgorod State National Research University, Belgorod, Russian Federation e-mail: [vbelenko@bsu.edu.ru](mailto:vbelenko@bsu.edu.ru)