

УДК 539.3

МАКРОСКОПИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ЯВЛЕНИЯ ДВОЙНИКОВАНИЯ В ОТОЖЖЕННОМ ТИТАНЕ ВТ1-0 В РЕЗУЛЬТАТЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНЦЕНТРИРОВАННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

© Н.В. Камышанченко¹⁾, И.С. Никулин¹⁾, И.Ю. Гончаров¹⁾, И.М. Неклюдов²⁾

¹⁾ Белгородский государственный университет, г. Белгород, Россия

²⁾ Харьковский физико-технический институт, г. Харьков, Украина

Ключевые слова: титан; двойникование; скольжение; дислокации, структура.

В работе представлена попытка макроскопического описания двойникования в отожженном титане ВТ1-0 в результате воздействия концентрированного напряжения, созданного внешней нагрузкой на алмазную пирамидку. Полученные результаты позволяют объяснить некоторые макроскопические процессы, протекающие в титане под воздействием внешних напряжений.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что клиновидный двойник при своем возникновении создает на внешней поверхности кристалла сложный рельеф. Изучение рельефа, созданного двойниковой прослойкой, имеет первостепенное значение для оценки размеров областей с искаженной кристаллической решеткой.

В наших опытах двойниковые прослойки получались в результате воздействия внешней нагрузкой на алмазную пирамидку по плоскости (0001) титана ВТ1-0.

Образованные в результате концентрированного воздействия напряжения в объеме поликристаллического титана вокруг отпечатка двойники клиновидной формы имели четкую огранку двойниковой прослойки на поверхности образца.

Используемое при исследовании современное оборудование позволило определить с достаточной точностью геометрические параметры образованных двойников, которые могут быть использованы при анализе результатов структурного состояния в металлах с ГПУ-решеткой.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве материала исследования был использован титановый сплав ВТ1-0.

Прутки титана (ГОСТ 26492-85) подвергались горячей прокатке при 500 °С с суммарным обжатием ~75 %. За один проход деформация составляла ~15 %. Из заготовок электроэрозионным способом на установке «Sodik» вырезались образцы вдоль прокатки размером 10×10 мм с последующей шлифовкой, механической и электролитической полировкой.

Для снятия внутренних напряжений образцы проходили полный рекристаллизационный отжиг в вакуумной печи в течение 1 ч при температуре 700 °С.

С помощью растрового электронного микроскопа «Quanta 200 3D» и программы «OIM Analysis 5.2» на поверхности образца выбирались зерна, кристалличе-

ская решетка в которых была ориентирована в плоскости (0001).

В отмеченных зернах с помощью микротвердомера «DM-8B» производилось индентирование четырехгранной алмазной пирамидкой со ступенчато повышающимися нагрузками в 10, 25 и 50 г. Время выдержки под нагрузкой составляло 15 с.

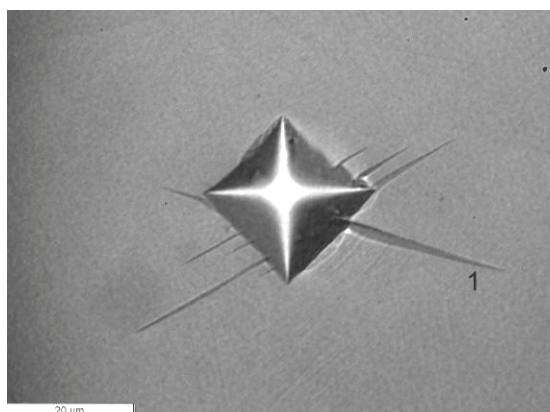
Полученные при индентировании клиновидные двойники изучались на оптическом микроскопе «Olympus GX51» и зондовой станции «Ntegra Aura». Для получения профилей сечения и анализа изображений, полученных с помощью сканирующего зондового микроскопа (СЗМ-изображение), использовалась программа «Image Analysis 2».

После проведенных на первом этапе исследований двойниковых прослоек весь образец протравливался в растворе плавиковой и азотной кислот в течение 12 с. Затем зоны двойникования еще раз исследовались с помощью оптического и зондового микроскопа. Исследования проводились при комнатной температуре.

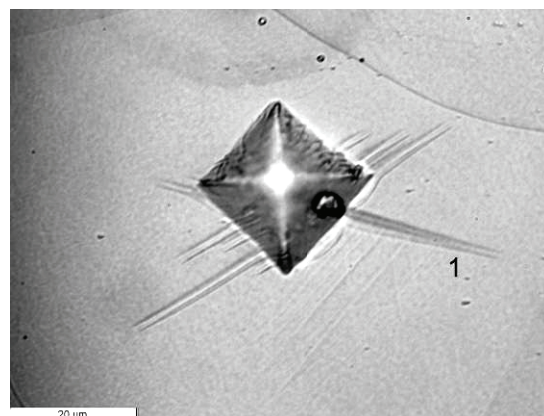
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

Двойники, образованные вокруг отпечатка в результате действия сосредоточенной нагрузки, имеют четко очерченные границы и клиновидную форму с постепенно уменьшающейся от устья к вершине толщиной.

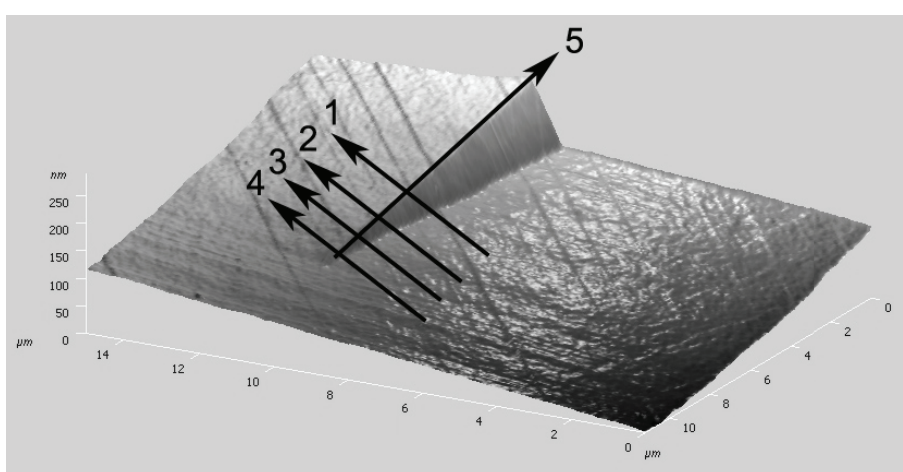
В качестве примера приведены основные параметры двойника №1 (рис. 1, а). Угол наклона двойниковой прослойки по отношению к базовой плоскости при этом меняется по величине от устья к вершине. В частности, в исследуемом титане ВТ1-0 этот угол меняется от ~ 8 до 0° (рис. 1, г). Ребро двойниковой прослойки имеет прогнутую форму с четко выделенными на гребне следами скольжения (рис. 1, д). Угол раствора конца клиновидного двойника равняется 0°. Интенсивное скольжение по базисным плоскостям материнского кристалла приводит к образованию т. н. аккомодационной полосы.



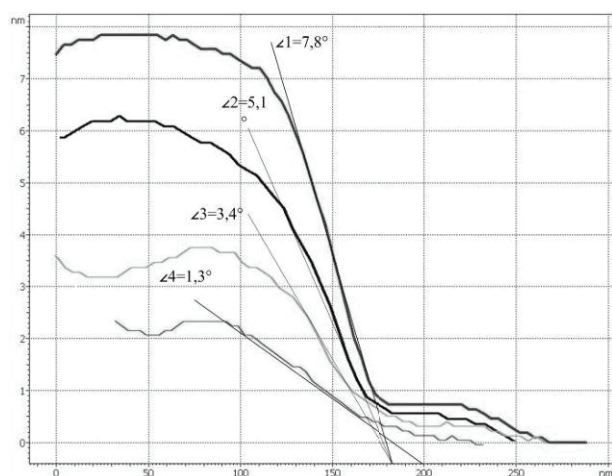
а)



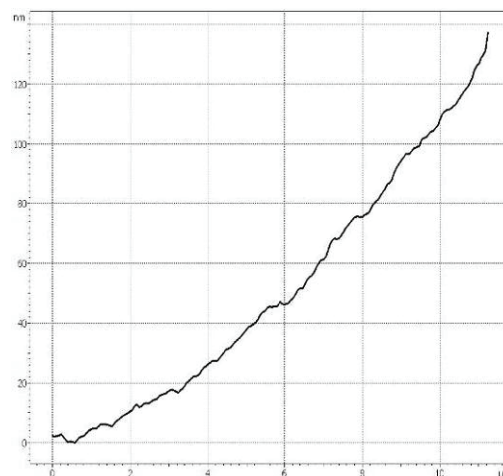
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Положение образовавшихся двойников вокруг отпечатка (а) и их вид после травления (б); форма двойниковой прослойки от устья к вершине (в); профиль сечения вдоль линий 1,2,3 и 4 (г); профиль сечения вдоль ребра двойниковой прослойки – линия 5 (д)

Данные об источниках двойникующих дислокаций можно получить косвенным путем, измеряя изменение геометрических параметров двойника у одного и того же концентратора напряжений. На примере двойника № 1 можно проследить развитие двойникующей прослойки под действием возрастающей нагрузки (табл. 1).

Таблица 1

Изменения параметров двойникующих прослоек под действием изменяющейся нагрузки

№ п/п	Величина нагрузки, г	Длина двойника, мкм	Толщина двойника, мкм	h/L
1	10	7,4	0,76	0,102
2	25	15,5	1,42	0,0916
3	50	23,2	1,89	0,081

Полученные параметры говорят о том, что в отожженных образцах двойники образуются очень тонкими. При этом профиль конца двойника остается острым. Можно сделать предположение о невысокой плотности дислокаций по мере удаления к концу двойника от устья, а развивающийся двойник при данных приложенных напряжениях не выбрал полностью двойниковую дислокационную прослойку и не встретил по пути своего развития препятствия, какими могут быть границы или другие препятствия.

Такие двойники хорошо описываются дислокационной моделью, предложенной авторами [1–3], которая позволяет понять физическую сущность параметра h/L.

Процесс двойникования проходит в кристалле с ориентацией (0001), при этом плоскостью двойникова-

ния является $(10\bar{1}2)$. В результате двойникования базисная плоскость двойниковой прослойки поворачивается на $97,93^\circ$, а плоскость $(10\bar{1}2)$ ориентируется по отношению к базисной плоскости в материнском кристалле под углом φ в пределах $7,93^\circ$ (рис. 2). Изменение величины угла φ зависит, очевидно, от степени искаженности кристаллической решетки.

Развитию двойниковой прослойки в титане предшествует скольжение как в материнском кристалле, так и в теле двойниковой прослойки по плоскости базиса (0001) (рис. 1).

Следы линий скольжения в результате двойникования меняют свою ориентацию в двойниковой прослойке, а наличие в линиях скольжения микроступенек является результатом перемещения полных дислокаций в плоскостях базиса при своем движении к вершине двойника. Угол между линиями базисного скольжения в материнском кристалле и их следами в двойниковой прослойке равен $\sim 6^\circ$.

Дислокации, осуществляющие скольжение в материнском кристалле, останавливаются на границе двойниковой прослойки и вызывают изменение рельефа как перед двойниковой прослойкой, так и за ней (рис. 3).

Более выпукло изменение рельефа происходит перед двойниковой плоскостью, где образуется впадина у границы двойника. Аналогичная картина была обнаружена в монокристаллах цинка и висмута [4, 5]. Рельеф перед истоком двойниковой прослойки характеризуется наличием не только впадины, но и наличием вспученной зоны. Вспученная зона имеется и за ребром двойниковой прослойки с четко ограниченной областью, сходящейся к концу двойника (рис. 3, 4).

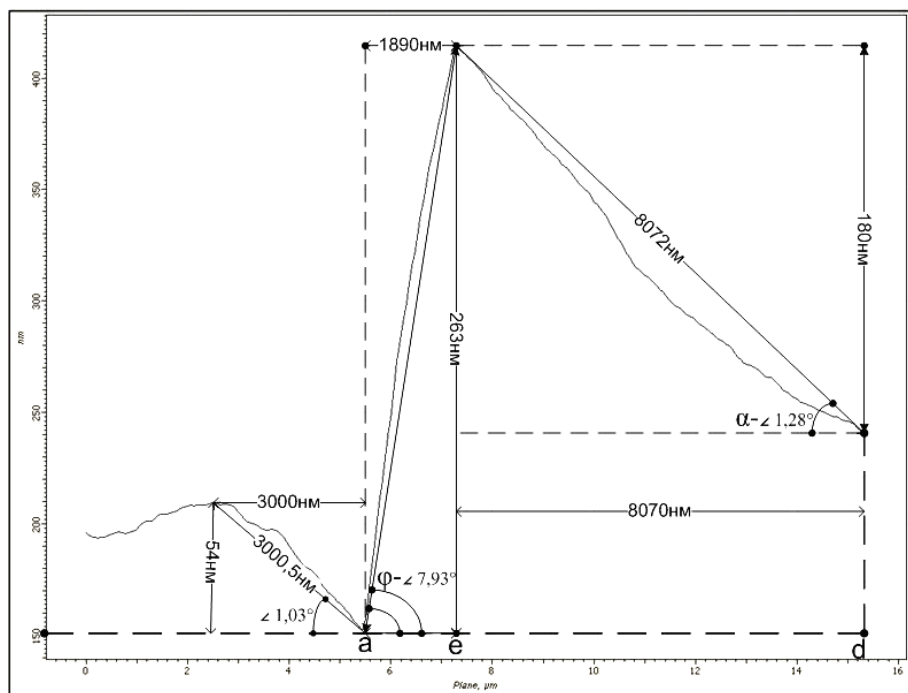


Рис. 2. Профиль сечения двойниковой прослойки в устье двойника

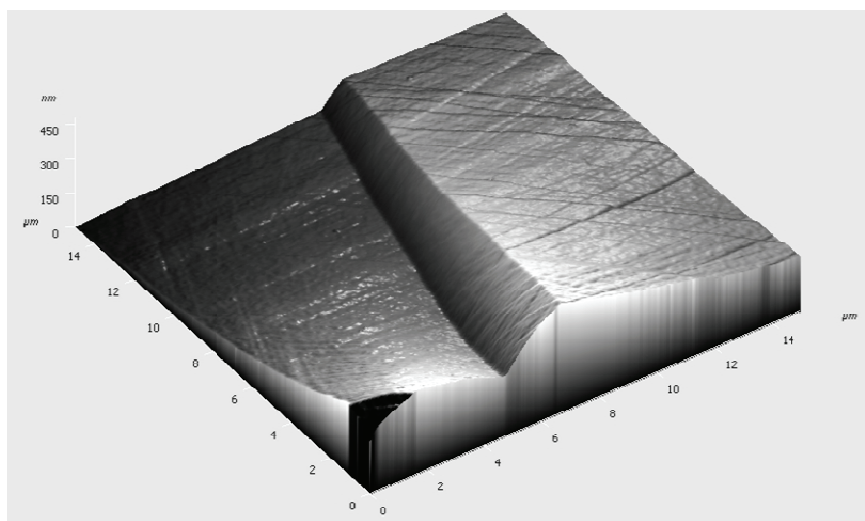
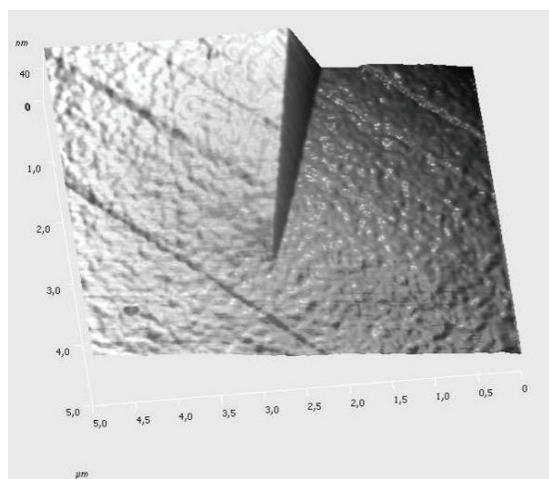
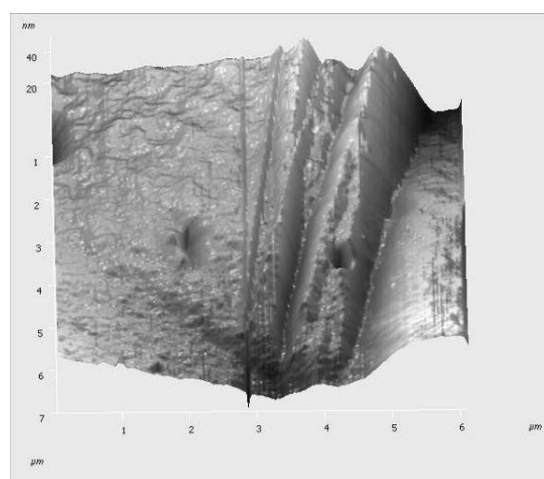


Рис. 3. СЗМ-изображение поверхности титана в зоне двойника



а)



б)

Рис. 4. СЗМ-изображение поверхности титана в зоне образовавшегося после индентирования двойника (а); эта же область после травления (б)

Размеры вспученных зон, расположенных перед двойниковой прослойкой и за ней, различны. Измерения ширины двойника и ширины вспученной зоны за ребром двойника, проведенные в его устье, показали, что зона вспучивания больше ширины двойника в 5–10 раз. Вспучивание появляется одновременно с возникновением двойника и растет по мере его развития, что влияет на величину угла между плоскостью аккомодации и базисной плоскостью за ребром двойниковой прослойки. Однако рост вспученной зоны как перед, так и за двойниковой прослойкой заметно отстает от роста двойника. Степень искажения во вспученной зоне обычно характеризуются величиной угла α [4], зависящего от ширины вспучивания [5]:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \varphi \times a e / e d, \quad (1)$$

где $e d$ – ширина вспучивания; $a e$ – ширина двойника (рис. 2).

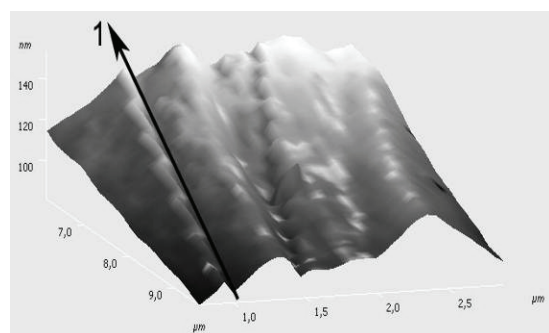
Выборочное определение значений $a e / e d$ для нескольких двойников позволило установить этот коэф-

фициент в пределах от 0,09 до 0,4, зависящий, очевидно, от степени совершенства того участка кристалла, на котором происходит двойникование.

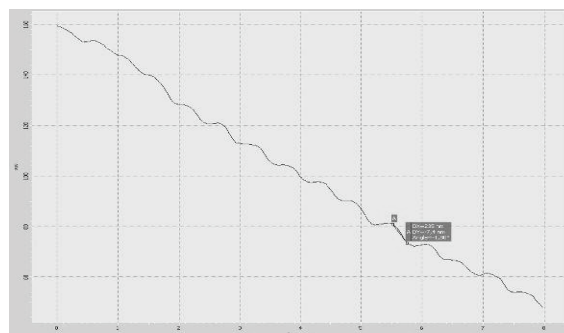
Проведенные исследования состояния поверхностных слоев в зонах аккомодации и двойниковой плоскости, подвергнутых травлению, представлены на рис. 4.

После травления граница области аккомодации и материнского кристалла за ребром двойника характеризуется выходом линий дислокаций, образующих стенку внутри кристалла (рис. 4, б). Распределение дислокаций в цепочку, как показывает профиль сечения (рис. 5, б), имеет циклическую последовательность протравленных ямок, что говорит о соответствующем структурном состоянии участка материнского кристалла на переходе в зону аккомодации [6].

Граница двойниковой прослойки и области аккомодации слева от гребня двойниковой прослойки очень сильно растравлены и имеют вид глубокой канавки (рис. 4, б). Степень этого «разъедания» травителем усиливается к концу двойниковой прослойки, что связано с возрастанием внутренних напряжений



а)



б)

Рис. 5. СЗМ-изображение поверхности титана в зоне двойника после травления; профиль сечения вдоль линии 1

с приближением к концу двойника. Благодаря наличию этого напряжения возможно возникновение в пластичных кристаллах интенсивного скольжения по базисным плоскостям материнского кристалла, вследствие чего и образуются т. н. аккомодационные полосы [4]. Двойничающие дислокации, осуществляющие процесс упругого двойникового, образуя локальную концентрацию упругих напряжений, влияют на величину угла раствора конца двойника, что, в свою очередь, влияет на положение аккомодационной полосы и размеров аккомодационной зоны за двойниковой плоскостью. Следы протравленной поверхности проявляются за двойниковой прослойкой и во вспученной зоне при переходе в материнскую плоскость, но в несколько меньшей форме, что позволяет утверждать о меньших значениях внутренних напряжений.

В отличие от рельефа зоны аккомодации за двойниковой прослойкой, перед двойниковой прослойкой наблюдается впадина, переходящая во вспученную зону. Величина этой вспученной зоны существенно меньше вспученной зоны за двойниковой прослойкой.

После травления обнаружено, что впадина, отделяющая двойниковую прослойку от аккомодационной зоны, имеет размеры в несколько микрон и не поддается, как и материнская часть образца, травлению. Очевидно, этот участок сохранил структуру исходного состояния материнского кристалла, и в этой части происходит процесс своеобразного отталкивания области аккомодации от двойника [7]. Отталкивание области аккомодации объясняется взаимодействием двойничающих дислокаций и полных дислокаций в области аккомодации. Происходящая в результате такого взаимодействия реакция энергетически не выгодна, и, следовательно, полные дислокации в области аккомодации отталкиваются от двойниковой границы, в результате чего область вблизи границы освобождается от дислокаций и принимает ориентацию материнского кристалла.

Очевидно, величина этой области зависит от структурного состояния исследуемого титана, что требует проведения дополнительных исследований.

ВЫВОДЫ

1. Величина аккомодационной зоны перед двойниковой прослойкой отличается от аккомодационной зоны за двойниковой прослойкой не только размерами вспученной области, но и структурой. В частности,

аккомодационная зона перед двойниковой плоскостью отделена узкой полоской с материнской структурой.

2. Аккомодационная зона за гребнем двойниковой прослойки отличается большими внутренними напряжениями, которые связываются с искажениями кристаллической структуры в области соприкосновения двойниковой прослойки и зоны вспучивания.

3. Наличие в линиях скольжения микроступенек является, очевидно, результатом взаимодействия полных дислокаций с двойничающими дислокациями в области аккомодации при своем движении к вершине двойниковой плоскости.

4. Образование тонких двойников объясняется невысокой плотностью дислокаций в объеме исследуемого титана, полученного в результате отжига.

ЛИТЕРАТУРА

1. Котрел А.Х. Дислокация и пластическое течение в кристаллах. М.: Металлургия, 1958.
2. Косевич В.М., Бойко В.С. Дислокационная теория упругого двойникового кристаллов // УФН. 1971. Т. 104. Вып. 2. С. 201-254.
3. Владимирский К.В. О двойниковании кальцита // ЖЭТФ. 1947. Т. 17. Вып. 6. С. 530-536.
4. Лаврентьев Ф.Ф., Старцев В.И. О структуре области аккомодации в монокристаллах цинка и висмута // ФММ. 1962. Т. 13. № 3. С. 441-450.
5. Старцев В.И., Косевич В.М. О рельефе, создаваемом двойниковыми прослойками на плоскостях спайности висмута, сурьмы и цинка // ФММ. 1956. Т. 11. № 2. С. 320-327.
6. Солдатов В.П. Изучение механизма распространения упругих двойников в металлах // ФММ. 1966. Т. 22. № 6. С. 924-930.
7. Старцев В.И., Бенгус В.З., Комник С.Н., Лаврентьев Ф.Ф. Взаимодействие дислокаций при двойниковании кристаллов // Кристаллография. 1963. Т. 8. № 4. С. 632-640.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования БелГУ.

Поступила в редакцию 15 апреля 2010 г.

Kamyshanchenko N.V., Nikulin I.S., Gonsharov I.J., Neklyudov I.M. Macroscopic description of the phenomenon of twinning in annealed titanium VT1-0 after concentrated loading. The paper presents an attempt to macroscopic description of twinning in the annealed titanium VT1-0 after impact concentrated stress created by external loads on the diamond pyramid. These results help to explain some macroscopic processes in titanium under the influence of external stresses.

Key words: titanium; twinning; slip; dislocations; structure.