УДК 539.4

МОРФОЛОГИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ ДЕФОРМАЦИОННОГО РЕЛЬЕФА [001]-МОНОКРИСТАЛЛОВ НИКЕЛЯ С БОКОВЫМИ ГРАНЯМИ {110}

Алфёрова Е.А., Черняков А.А.

Юргинский технологический институт (филиал) Томского политехнического университета, г.Юрга

Работа посвящена изучению морфологии и эволюции деформационного рельефа [001]-монокристаллов никеля с боковыми гранями {110}. Показано, что картина фрагментации представлена доменами сдвиговой деформации, основными структурными элементами деформационного рельефа являются пачки следов сдвига и макрополосы. Организация деформации на различных уровнях (образец целиком, отдельный структурный элемент рельефа) качественно подобна и носит квазипериодический характер. Определена доля площади занятая различными структурными элементами рельефа при различных степенях деформации. Выявлено, что следы сдвига при увеличении степени деформации эволюционируют в макрополосы. Морфология элементов рельефа исследована с привлечением интерференционной микроскопии. Показано, что макрополоса формируется отдельными ступенями сдвига и имеет квазипериодический характер профиль. Согласованный сдвиг в системах скольжения, формирующих макрополосы, в конечном итоге определяет величину сдвига в ней. Определена величина сдвига в макрополосах и следах сдвига. Использую метод дифракции обратно отражённых электронов определены ориентации локальных областей поверхности (EBSD-анализ) и подтвержден аккомодационный характер макрополос. В работе приведены данные по разориентации локальных мест при деформации е = 39%. Выявлено, что в областях до и после макрополосы отклонение от направления (110) идет в сторону либо ориентации (102) либо (212). В самой макрополосе разориентировки идут сразу в двух направлениях, т.е. можно говорить о том, что макрополоса осуществляет подстройку ориентаций соседних локальных областей, компенсирует их разориентировки и носит аккомодационный характер. Ключевые слова: деформационный рельеф, величина сдвига, монокристалл, EBSD, макрополосы

MORPHOLOGY AND EVOLUTION OF DEFORMATION RELIEF [001] SINGLE CRYSTAL OF NICKEL WITH THE SIDE FACES {110}

Alfyorova E.A., Cherniakov A.A.

Yurginskij Technological Institute (branch) of Tomsk Polytechnic University, Yurga

This paper studies the evolution of morphology and strain relief [001] single crystal of nickel - side faces {110}. It is shown that the fragmentation pattern is presented domains shear deformation, the main structural elements of deformation relief packs are traces shift and macrobands. Organization at different levels of deformation (sample as a whole, separate structural element of relief) and is qualitatively similar to the quasi-periodic nature. Defined fraction of the area occupied by the various structural elements of the relief at different degrees of deformation. Revealed that traces the shift with increasing degree of deformation evolve macrobands. The morphology of the relief elements investigated involving interference microscopy. It is shown that the individual stages macrobands formed shear and has quasi-periodic profile. Coordinated slip systems shift forming macrobands ultimately determines an offset value therein. The magnitude of the shift in macrobands and traces the shift. Diffraction method using back scattered electrons (EBSD- analysis) to determine the orientation of local surface areas and confirmed accommodative nature macrobands. The paper presents data on the disorientation of local areas with strain e = 39 %. Revealed that in the areas before and after macrobands deviation from the (110) goes in the direction or orientation (102) or (212). In most macrobands disorientation go in two directions , ie we can say that the next adjustment macrobands orientations neighboring local regions compensates their disorientation and is accommodative nature.

Keywords: a deformation relief, the amount of shift, single crystal, EBSD, macrobands

Для установления механизмов и закономерностей пластической деформации целесообразно в качестве модельного материала использование относительно «простых» объектов - монокристаллов. Кроме того, монокристаллы находят применение в авиационной промышленности. Поэтому полученные на монокристаллах результаты, имеют фундаментальную и практическую ценность. Благодаря опыту эксплуатации было выявлено,

что наиболее благоприятной для изготовления деталей машин является ориентация монокристаллов [001].

Целью работы является выявление закономерностей образования и эволюции структурных элементов деформационного рельефа (СЭДР) [001]-монокристаллов, рассмотрение способов их организации, с привлечением интерференционной микроскопии и метода дифракции обратно отражённых электронов (EBSD-анализ).

Материал и методика

В работе использовали образцы монокристаллов никеля (примеси менее 0,01%, выращенные по методу Бриджмена) с ориентацией оси сжатия [001] и боковыми гранями {110}. Деформирование сжатием проводили на испытательной машине Instron ElektroPuls E10000 со скоростью $1,4\cdot10^{-3}$ с⁻¹ при комнатной температуре, с применением графитовой смазки. Деформационный рельеф исследовали на оптическом микроскопе Leica DM 2500P и растровом электронном микроскопе Tescan Vega II LMU. Параметры рельефа определяли на микроинтерферометре NewView 7200 деформационного (погрешность ±1%). Разориентацию локальных областей определяли при помощи EBSDприставки к микроскопу Tescan Vega II LMU.

Экспериментальные результаты

Для рассматриваемых монокристаллов общее число систем сдвига с фактором Шмида 0,41 равно 8. Характерная картина фрагментации [001]-монокристаллов с боковыми гранями {110} и ее эволюция показана на (рис. 1). Подобная картина фрагментации отмечалась и на монокристаллах алюминия [2, 8]. Картина деформационного рельефа с начальных степеней нагружения (е = 3%) представлена следами сдвига. С развитием деформации происходит огрубление следов вдоль границы областей с разной схемой напряженного состояния, они фактически преобразуются в макрополосы деформации. С увеличением степени деформации преимущественное развитие имеют две макрополосы, идущие от противоположных концентраторов, они препятствуют развитию двух других макрополос. При этом можно наблюдать некоторое отклонение макрополос от выхода октаэдрических плоскостей. Отклонение с ростом степени деформации увеличивается, достигая 5°...15° (рис. 1). Начиная с деформации е = 25% дополнительно наблюдается искривление образца. Параллельно макрополосам формируются следы сдвига, которые огрубляются по мере приближения к макрополосам и при дальнейшей деформации организуются в них. Уже с е = 5% можно наблюдать соединение макрополос, формирующихся у противоположных базовых концентраторов напряжений (рис. 1, *a*), и дальнейшее их взаимопроникновение и развитие (рис. 1, б). При этом доля площади грани занятая макрополосами заметно увеличивается (рис. 2), доля площади, занимаемая следами сдвига, существенно не возрастает. Это свидетельствует о том, что постоянно формирующиеся следы с развитием деформации перестраиваются в макрополосы. В работе [3] высказывается предположение, что макрополосы, идущие от одних и тех же концентраторов напряжений на гранях b и d, формируют объемное образование, пронизывающее монокристалл насквозь.



Рис. 1. Деформационный рельеф, сформировавшийся на боковой грани (110)d монокристалла никеля с ориентацией оси сжатия [001], после e = 5% (*a*), e = 15% (*б*)

В приторцевой области формируется пачка горизонтальных следов, с увеличением степени деформации она занимает все большую площадь грани и отклоняется от горизонтального расположения, при деформации 49% отклонение достигает 20°. При этом на грани (110)a горизонтальная система занимает существенно большую площадь, чем на грани (110)b (аналогичная ситуация на гранях c u d), т.е. можно наблюдать асимметрию сдвига (рис. 2).



Рис. 2. Процент площади грани, занятой следами сдвига грань (110)*a* (кривая 1♦); грань (110)*b* (кривая 2∎); макрополосами грань (110)*a* (кривая 3●); макрополосами грань (110)*b*

(кривая 4▲) – *a*; процент площади грани, занятой горизонтальной системой следов сдвига грань (110)*a* (кривая 1●); грань (110)*b* (кривая 2■) – *б*

Более развитые макрополосы деформации на гранях *b* и *d* дают более развитые системы горизонтальных следов на гранях *a* и *c*. С е = 9% у торцов образца начинают формироваться приторцевые складки, которые работают совместно с горизонтальной системой следов. С ростом степени деформации приторцевые складки становятся все более грубыми и «поглощают» часть горизонтальных следов, что объясняет некоторое уменьшение доли площади занятой горизонтальной системой (рис. 2).

В настоящей работе были проведены дополнительные исследования морфологии рельефа [001]-монокристаллов с использованием интерференционной микроскопии. Использование данного метода позволило более детально рассмотреть морфологию и закономерности развития сдвига.

На рис. 3 показан профиль поверхности на боковой грани (110) монокристалла никеля с ориентацией оси сжатия [001] после е = 10%. Если при рассмотрении оптических снимков поверхности (рис. 1) макрополосы представляются отдельным элементом деформационного рельефа, то при рассмотрении профиля поверхности с большим увеличением можно разрешить отдельные ступени сдвига, которые формируют макрополосу и отметить квазипериодический характер профиля. Качественное подобие сохраняется и при увеличении степени деформации до 10%. Величина сдвига в макрополосах при е = 3% составляет 90...3500 нм, в следах сдвига, их образующих – 50...100 нм. Расстояние между следами сдвига составляет порядка 3...5 мкм внутри макрополосы и 10...15 мкм по ее краям, ширина макрополос достигает 300 мкм, глубина – 2...3 мкм. При увеличении степени деформации до e = 10% происходит увеличения плотности следов сдвига, их огрубление и организация в макрополосы, которые захватывают все большую площадь грани (рис. 2). На макроуровне можно зафиксировать искривление образца и все большее усиление «волнистости» поверхности монокристалла. Глубина макрополос доходит до 10 мкм. Развитие макрополос деформации происходит одновременно по длине, ширине и глубине.



4

Рис. 3. Деформационный рельеф на боковой грани (110) монокристалла никеля с ориентацией оси сжатия [001] после е = 10%, с обозначением секущих (*a*), профиль поверхности вдоль соответствующих секущих (б)

Таким образом, следы сдвига, обеспечивая согласованный сдвиг в системах скольжения, формируют макрополосы как структурный элемент деформационного рельефа макроуровня. Величина сдвига в следе определяется степенью деформации и в конечном итоге определяет величину сдвига в макрополосе.

Анализ данных интерференционной микроскопии, кроме квазипериодического характера изменения профиля поверхности, позволил выделить области экструзии и интрузии материала. Однако, данный процесс представляет собой задачу самостоятельного исследования и будет предметом отдельной публикации. Здесь же отметим, что аналогичный процесс отмечался авторами ранее на [111]-монокристаллах [9]. В литературе имеются данные о том, что макрополосы с областями экструзии и интрузии материала формируются при циклической деформации [10-12]. Причем процесс экструзии-интрузии материала свойственнее как моно- так и поликристаллам и наблюдается при разных видах нагружения (циклическая деформация, сжатие).

Ранее авторы количественно показали, что в монокристаллах с осью сжатия [001] и боковыми гранями {110} деформация протекает наиболее однородно [1, 4]. При сравнении [001]-монокристаллов с разными боковыми гранями, выявили, что для образцов с боковыми гранями {110} неоднородность деформации, оцененная по всей грани, ниже, чем для случая граней {110}, приблизительно в 1,4 раза. Следовательно, на распределение деформации влияет кристаллографическая ориентации боковых граней, которая определяет организацию сдвига в макромасштабе образца. В рассматриваемом случае места локализации деформации отсутствуют даже по границам деформационных доменов и по границе областей с разной схемой напряженного состояния. Следовательно, можно говорить о том, что макрополосы в [001]-монокристаллах с боковыми гранями {110} носят аккомодационный характер. Их формирование направлено на более однородное протекание деформации, особенно в потенциально опасных с точки зрения локализации местах (стыки доменов, граница областей с разной схемой напряженного состояния). Аккомодационный характер макрополос ранее обсуждался в работе [3]. Однако, механизм аккомодации пока остается не ясен.

Для более подробного изучения данного вопроса в работе проводили исследования с использованием метода дифракции обратно отражённых электронов (EBSD-анализ). На рис. 4 показаны результаты по распределению ориентации локальных областей поверхности вблизи формирования макрополос при деформации е = 39%. В области выше макрополосы (область 1 на рис. 4), где формируются следы сдвига, отмечается отклонение от направления грани (110) в сторону (102), но при этом разбросов ориентации не наблюдается.

5



Рис. 4. Распределение ориентации локальных областей поверхности вблизи формирования макрополос

Разориентация соседних областей друг относительно друг составляет порядка 1°20'. По мере приближения к (область макрополосе 2 на рис. 4) ориентация несколько изменяется И увеличивается ее размытие. Величина разориентации соседних областей достигает 2°. При рассмотрении поведения величины разориентации относительно заданной точки можно наблюдать квазипериодический характер ее изменения при общей тенденции увеличения по мере приближения к макрополосе до 4°. Непосредственно на гребне макрополосы (область 3 на рис. 4) отмечается более значительный уход от

направления (110) и разброс, при этом ориентация изменяется в сторону (102) и (231). Здесь наблюдаются резкие границы, на которых изменение ориентации соседних областей достигает 15°. При переходе через макрополосу, в области, где наблюдается система следов параллельная макрополосе (область 4 на рис. 4) ориентация становится более четкой и отклоняется в сторону (212). Соседние области разориентированы друг относительно друга в пределах 3...4°. Кроме того, перпендикулярно развитой макрополосе можно выделить менее развитую вторичную макрополосу (область 5 на рис. 4), развитию которой препятствует рассмотренная выше. Ориентация в этой области отклоняется в двух направлениях – (212) и (231). Вдоль вторичной макрополосы наблюдаются четкие границы, на которых величина разориентации не превышает 3...4°. При переходе через вторичную макрополосу (область 6 на рис. 4), в области, где наблюдаются следы, ориентация отклоняется в направлении (231), 2...3°. Рассмотрение величина разориентации составляет изменения величины разориентации относительно первой точки показало, что характер поведения аналогичен случаю описанному выше для области 2 рис. 4, при приближении к макрополосе величина разориентации достигает 5°. В области 7 на рис. 4 дополнительно к системе следов образуются поперечные полосы идет отклонение ориентации в сторону (212). Между поперечными полосами разориентация соседних областей составляет порядка 2°, в самих полосах – до 4...5°. Вместе с тем, при рассмотрении этих полос в отдельности при большем увеличении и при удалении от макрополосы (направление указано на рис. 4 белой стрелкой),

ориентация практически не отклоняется от направления (110). Величина разориентации соседних областей в пределах 1°, однако, выделяются границы, на которых величина разориентации достигает 4...5°. Следовательно, в областях до и после макрополосы можно наблюдать, что отклонение от направления (110) идет в сторону одной из двух ориентаций – (102) или (212). Непосредственно в макрополосе разориентировки идут сразу в двух направлениях. Следовательно, можно говорить о том, что макрополоса осуществляет подстройку ориентаций соседних локальных областей, компенсирует их разориентировки и носит аккомодационный характер.

Таким образом, с увеличением степени деформации происходит развитие структурных элементов деформационного рельефа и образование аккомодационных макрополос деформации. При этом организация деформации на различных уровнях (в масштабе: образца, отдельного СЭДР) качественно подобна. При рассмотрении грани образца целиком можно выделить «волнистость» ее поверхности, обусловленную формированием макрополос деформации и складок. Профиль отдельных структурных элементов деформационного рельефа демонстрирует их квазипериодический характер, равно как и распределение величины сдвига вдоль структурного элемента рельефа. Все это согласуется с более ранними результатами авторов, в которых методом сетки показано, что распределение компонент деформации вдоль отдельного структурного элемента носит осциллирующий характер [5].

Эффект периодичности и самоподобия при деформации отмечается многими авторами в экспериментах и подтверждается теоретически [6-7, 13-14]. Такой способ организации деформации энергетически выгоден.

В заключении авторы благодарят профессора Лычагина Дмитрия Васильевича за творческие дискуссии и полезные советы.

Исследования проведены с использованием оборудования центра коллективного пользования «Аналитический центр геохимии природных систем» Национального исследовательского Томского государственного университета.

Список литературы

1. Алфёрова Е.А., Лычагин А.Д., Лычагин Д.В., Старенченко В.А. Неоднородность деформации монокристаллов никеля с разной кристаллогеометрической установкой // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. – 2012. – Т.9. – №2. – С. 218-224.

2. Лычагин Д.В., Теплякова Л.А. Первичная макрофрагментация сдвига в монокристаллах алюминия при сжатии // Письма в ЖТФ. – 2003. – Т.29. – вып.12. – С. 68-73.

7

3. Лычагин Д.В., Старенченко В.А., Шаехов Р.В., Конева Н.А., Козлов Э.В. Организация деформации в монокристаллах никеля с ориентацией оси сжатия [001] и боковыми гранями {110} // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т.8. – №2. – С. 39-48.

4. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А., Шаехов Р.В. Влияние кристаллогеометрической установки на неоднородность сдвиговой деформации ГЦК-монокристаллов при сжатии // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2008. – Т.5. – №2. – С. 101-108.

5. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А. Причины развития неоднородной пластической деформации ГЦК-монокристаллов, деформированных сжатием // Деформация и разрушение материалов. – 2010. – №10. – С. 1-10.

6. Моисеенко Д.Д., Максимов П.В. Распределение напряжений и деформаций на интерфейсе «поверхностный слой-подложка: моделирование на основе стохастического подхода // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8. – №6. – С. 89-96.

7. Старенченко В.А., Лычагин Д.В. Геометрический эффект в упрочнении и локализации деформации ГЦК-монокристаллов // Физическая мезомеханика. – 2000. – Т. 3. – № 2. – С. 47-54.

8. Теплякова Л.А., Лычагин Д.В., Козлов Э.В. Локализация сдвига при деформации монокристаллов алюминия с ориентацией оси сжатия [001] // Физическая мезомеханика. – 2002. – Т.5. – №6. – С. 49-55.

9. Alfyorova E.A., Lychagin D.V. Characterization of deformation pattern structure elements generated in uniaxial compression of nickel single crystals // Applied Mechanics and Materials. – Vol. 379. – 2013. – pp 66-70.

10. Differt K., Essmann U. and Mughrabi H. Model of extrusions and intrusions in fatigued metal: II. Surface roughening by random irreversible slip. // Philosophical Magazine. – 1986. – p.237.

11. Man J., Klapetekb P., Man O., Weidner A., Obrtlı'k K. and Pola'k J. Extrusions and intrusions in fatigued metals. Part 2. AFM and EBSD study of the early growth of extrusions and intrusions in 316L steel fatigued at room temperature // Philosophical Magazine. – 2009. – V. 89. – №.16. – P. 1337-1372.

12. Mughrabi H., Bayerlein M. and Wang R. Direct measurement of the rate of extrusion growth in fatigued copper mono- and polycrystals. // Proceedings of the Ninth International Conference on Strength of Metals and Alloys (ICSMA 9). -1991. - V. 2. - p.879.

13. Mughrabi H. Dislocations in fatigue, in Dislocations and Properties of Real Materials // The Institute of Metals, London. – 1985. – №323. – P. 244-262.

14. Obrtlik K., Man J. and Polak J. Orientation dependence of surface relief topography in fatigued copper single crystals. // Mater. Sci. Eng. – 1997. – P. 727-730.

Рецензенты:

Козлобродов А.Н., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Теплогазоснабжение» Томского архитектурно-строительного университета, г. Томск.

Немова Т.Н., д.т.н., с.н.с., профессор кафедры «Теплогазоснабжение» Томского архитектурно-строительного университета, г. Томск.