

УДК 538.9

КВАЗИПЕРИОДИЧЕСКИЙ ПРОФИЛЬ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ МАКРОПОЛОС ДЕФОРМАЦИИ В МОНОКРИСТАЛЛАХ НИКЕЛЯ

Алфёрова Е.А.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Томск,
e-mail: katerina525@mail.ru*

В статье представлены экспериментальные результаты по способам организации пластической деформации в системах макрополос на примере монокристаллов никеля при одноосном сжатии. Для обнаружения влияния кристаллогеометрии монокристаллов на организацию деформации были рассмотрены монокристаллы никеля с точной ориентацией оси сжатия $[\bar{1}11]$ и кристаллы с отклонением оси сжатия от направления $[\bar{1}11]$ на 2° – ось сжатия $[\bar{3}0.33.33]$. Показано, что несмотря на различие в кристаллогеометрии кристаллов квазипериодический профиль является общим способом организации деформации. Макрополосы представляют собой сформированные кооперативными сдвиговыми процессами по октаэдрическим плоскостям структуры на поверхности образца. Важной чертой формирования макрополос является наличие областей экструзии и интрузии. Развитие периодического профиля поверхности способствует релаксации напряжения и снижает неоднородность деформации.

Ключевые слова: ГЦК-монокристалл, квазипериодический профиль, макрополоса, неоднородность пластической деформации, организация деформации, сдвиг

QUASIPERIODIC SURFACE PROFILE DURING THE FORMATION MACROBANDS DEFORMATION IN SINGLE CRYSTALS OF NICKEL

Alfyorova E.A.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: katerina525@mail.ru

The paper presents experimental results on the ways organization of plastic deformation in the systems of macrobands for example nickel single crystals under uniaxial compression. Nickel single crystals has been examined with the exact orientation of the compression axis $[\bar{1}11]$ and crystals with a deviation from the direction of the axis of compression $[\bar{1}11]$ 2° – axis compression $[\bar{3}0.33.33]$ for the detection of the effect of the crystal geometry on the organization of deformation of single crystals. The results show that despite of the differences in crystal geometry of the crystals a quasiperiodic profile is a common way to organize strain. Macrobands are being formed with cooperative shear processes on octahedral planes. We can observe these structures on the sample surface. Availability of areas of extrusion and intrusion is an important feature of the formation macrobands. The development of a periodic surface profile conducive to relaxation and reduces stress the heterogeneity of deformation.

Keywords: fcc single crystal, quasiperiodic profile, macrobands, heterogeneity of plastic deformation, organization of the deformation, a shift

Изменения морфологических параметров поверхности нагруженного тела интересуют исследователей из разных областей уже долгие годы. Экспериментальные результаты и данные математических моделей свидетельствуют о том, что складкообразование, гофрирование, шахматное распределение областей экструзии и интрузии и т.д. являются частым явлением и возникают в различных условиях нагружения [1-3, 8-10]. Этот процесс характерен для поли- и монокристаллов, складкообразование можно наблюдать и в геологии [2]. Складкообразование проявляется при разных способах деформации, имеет многообразные проявления и может быть инициировано как скольжением, так и двойникованием. В работе [3] складкообразование наблюдалось в сталях, деформирующихся двойникованием. В работе [9] представлены экспериментальные данные, полученные на поли-

кристаллах алюминиевых сплавов, которые свидетельствуют о влиянии размера и ориентации зерен на шероховатость при пластической деформации. При этом во всех случаях наблюдается квазипериодический профиль поверхности после нагружения.

В ряде работ Губернаторова В.В. с коллегами причиной гофрирования поверхности называется искажение слоев материала, а также показывается, что гофр может формироваться и в структурно-однородном материале (монокристалл), т.е. наличие базовых концентраторов напряжений не является обязательным условием [1]. Данный факт объясняется тем, что потеря устойчивости слоями материала возникает из-за наличия знакопеременных напряжений на мезоуровне деформации в условиях стесненного сдвига. В работе отмечается, что гофрирование является следствием градиента напряженно-деформированного состо-

яния по сечению образца и стесненности деформации слоев материала в очаге.

Процесс формирования складок, шахматного распределения областей экструзии и интрузии рассматривался с точки зрения физической мезомеханики [8]. В рамках этого подхода обоснована многомасштабность процесса, проведена связь с границами раздела разнообразной природы, а поверхностный слой рассматривается как самостоятельный структурный уровень.

Таким образом, рассматривая накопленный экспериментальный и теоретический материал, можно сделать заключение о том, что формирование квазипериодического профиля изначально плоской поверхности является характерным процессом при деформировании материалов различными способами. Причины этого процесса могут быть различны. На сегодняшний день в литературе обсуждаются различные обстоятельства его происхождения.

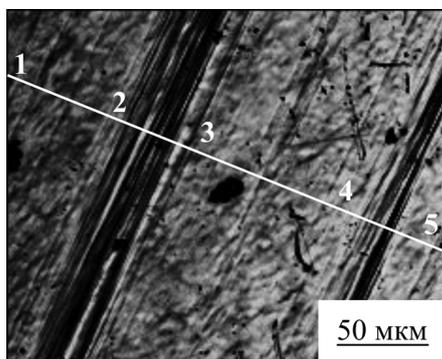
В своих более ранних исследованиях автор с коллегами не раз указывали на квазипериодический профиль поверхности монокристаллов после пластической деформации и на периодичность распределения величин деформации (в том числе чередование локальных мест растяжения и сжатия) [4]. При этом были описаны отличительные особенности морфологии, характерные для различных типов структурных элементов деформационного рельефа (СЭДР).

Настоящая работа направлена на дальнейшее более глубокое исследование периодичности профиля поверхности. В работе основное внимание уделяется исследованию $[\bar{1}\bar{1}1]$ -монокристаллов никеля с различной кристаллогеометрией.

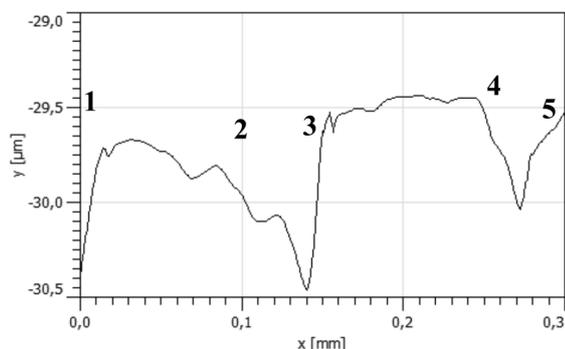
В работе исследовали образцы никелевых монокристаллов в форме прямых правильных тетрагональных призм с боковыми гранями (110) и $(1\bar{1}2)$. Также изучали монокристаллы в форме тетрагональных призм, имеющие отклонение оси сжатия на $2^\circ \dots 3^\circ$ от ориентации $[\bar{1}\bar{1}1]$ – ось сжатия $[\bar{3}0.33.33]$ боковые грани – (110) и $(10.\bar{1}0.22)$. Деформирование сжатием проводили со скоростью $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$ при комнатной температуре с использованием графитовой смазки. Картина деформационного рельефа и его параметры получены с использованием конфокальной микроскопии на микроскопе Olympus OLS4100.

В настоящей работе рассмотрим особенности формирования структурных элементов деформационного рельефа, которые в работе [5] авторы классифицировали как макрополосы деформации. По своей сути они также представляют собой квазипериодическую структуру с рядом характерных для той или иной кристаллогеометрической ориентации деталей.

С началом нагружения в $[\bar{1}\bar{1}1]$ -монокристаллах в областях наиболее высокой концентрации напряжений (вершины и приторцевые ребра образца) формируются следы сдвига, т.е. реализуется сдвиговой механизм деформации. Здесь мы уже наблюдаем квазипериодический профиль поверхности. С увеличением степени деформации начинается формирование других структурных элементов рельефа. Таких как макрополосы и складки различного типа [5]. Они развиваются группами и представляют собой системы с определенной ориентацией. Деформацией данных структурных элементов осуществляется большая часть деформации всего образца в пределах $\epsilon = 0,05 \dots 0,15$.



а



б

Рис. 1. Картина деформационного рельефа – а, профиль поверхности, вдоль секущей 1-5 – б в области формирования макрополос. Монокристалл никеля ось сжатия $[\bar{1}\bar{1}1]$, боковая грань (110) , $\epsilon = 10\%$

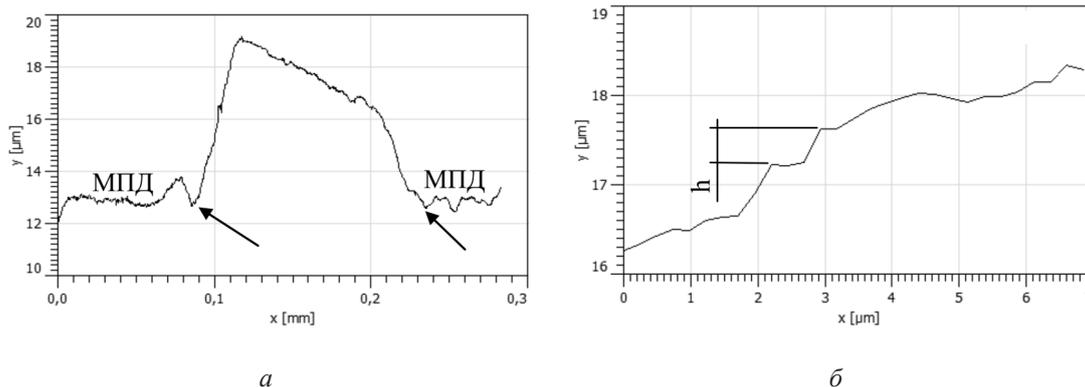


Рис. 2. Профиль поверхности, вдоль секущей перпендикулярной МПД – а (стрелками обозначены области интрузии), увеличенный профиль поверхности в МПД – б (h-ступенька сдвига).
Монокристалл никеля ось сжатия $[30.33.33]$, боковая грань (110) , $e = 14\%$

Для монокристаллов в форме прямой правильной тетрагональной призмы с точной ориентацией оси сжатия $[\bar{1}11]$ для грани (110) характерным является формирование двух систем макрополос (МПД). При этом между макрополосами разрешаются лишь отдельные следы сдвига параллельные макрополосам. Однако при деформации 31% между макрополосами можно видеть перпендикулярные им редкие следы сдвига.

Профиль поверхности для описанного выше случая показан на рис. 1.

При анализе можно отметить, что макрополоса представляет собой определенным образом организованные следы сдвига, т.е. реализуется механизм скольжения. В этом случае каждая макрополоса состоит из элементов деформационного рельефа более низкого масштаба. Сопоставление картины деформационного рельефа и профиля поверхности дает информацию о том, что рельеф представляет собой квазипериодическую структуру. При этом макрополоса соответствует зоне впадины на профиле (участки 2-3 и 4-5), а области между макрополосами – зоне выступов (участки 1-2 и 3-4). Следовательно, в месте формирования макрополос можно наблюдать развитие областей экструзии и интрузии материала. Данное явление достаточно часто наблюдается авторами при анализе макрополос деформации и обсуждается другими авторами в литературе.

На рис. 2 приведены результаты исследований для монокристалла в форме тетрагональной призмы, имеющие отклонение оси сжатия на $2^\circ \dots 3^\circ$ от ориентации $[\bar{1}11]$ – ось сжатия $[30.33.33]$ боковая грань (110) .

Известно, что для данной ориентации формируется лишь одна система макро-

полос, которая, однако, распространяется почти на всю грань [5]. Такое монополюсное развитие одной системы обусловлено изменением кристаллогеометрии образца, при котором одна из октаэдрических систем сдвига получает более выигрышную ориентацию. Это также приводит и к тому, что поперек макрополос формируется развитая система следов сдвига. Этого не было отмечено для монокристалла с точной ориентацией оси сжатия при указанной степени деформации.

Из рис. 2 видно, что характер профиля макрополос в образце с осью сжатия $[30.33.33]$ отличается от образца с точной ориентацией оси сжатия. Вместе с тем, несмотря на ряд морфологических отличий можно выделить и общие черты. Такие как периодичность профиля, наличие областей экструзии / интрузии и ступеней сдвига.

Ранее автором с коллегами были получены экспериментальные данные по распределению деформации на гранях монокристаллов. Эти результаты свидетельствуют о том, что на макроуровне деформация в $[\bar{1}11]$ и $[30.33.33]$ -монокристаллах протекает довольно однородно [5]. И как показывают результаты анализа профиля поверхности, в этом случае волнистость поверхности (квазипериодичность профиля) образца очень развита.

Подобные структуры наблюдались многими авторами для разных случаев деформации и описаны в ряде литературных источников. В работах [6-7] приведены данные об особенностях морфологии поверхности для поли- и монокристаллов в условиях усталостной деформации. Структуры, подобные описываемым выше, рассматриваются в [6-7] как устойчивые полосы скольжения. Указывается, что морфологи-

ческие характеристики следов сдвига ГЦК моно- и поликристаллов различаются. Хорошо развитые следы сдвига, организованные в структурные элементы деформационного рельефа более крупного масштабного уровня характерны для монокристаллов, а одиночные следы сдвига – для поликристаллов. Вместе с тем, одиночные следы характерны и для монокристаллов.

Полосы интрузии рассматриваются в работе [6] как один из вариантов развития следов сдвига при пластической деформации, при этом их развитие идет в направлении активной плоскости скольжения. Области экструзии образованы семейством параллельных линий скольжения, т.е. основная роль отдается механизму октаэдрического скольжения. Аналогичные результаты наблюдаются автором и на монокристаллах никеля.

Таким образом, макрополосы это структурные элементы деформационного рельефа макроуровня. Они сформированы, определенным образом организованными следами скольжения и образуют на поверхности квазипериодический профиль (складчатый профиль, гофрирование). При этом для формирования макрополос деформации характерным является развитие областей экструзии и интрузии, также посредством октаэдрического скольжения. Такой способ организации пластической деформации способствует уменьшению неоднородности деформации.

Полученные экспериментальные данные и обзор литературы показывают, что формирование складчатых структур характерно для различных областей науки и природы и имеет своей целью сохранение целостности объекта при его нагружении.

В заключении автор выражает благодарность д.ф.-м.н., профессору Д.В. Лыча-

гину за плодотворное сотрудничество и обсуждение результатов и к.т.н., м.н.с. ИФПМ СО РАН А.В. Филиппову за помощь в получении экспериментальных результатов.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 16-32-60007 мол_а_дк.

Список литературы

1. Губернаторов В.В., Сычева Т.С., Владимиров Л.Р. и др. Явление гофрирования и формирования структуры и текстуры в металлических материалах при деформации и рекристаллизации: 2. Сплавы кубической сингонии // Физическая мезомеханика. – 2002. – № 5. – Т. 6. – С. 95–99.
2. Кирмасов А.Б. Основы структурного анализа. – М.: Научный мир. – 2011. – 368 с.
3. Khoddam S., Beladi H., Hodgson P.D., Zarei-Hanzaki A. Surface wrinkling of the twinning induced plasticity steel during the tensile and torsion tests // Materials and Design. – 2014 – № 60. – pp. 146–152.
4. Lychagin D.V., Alfyorova E.A. and Tailashev A.S. Misorientation Development During the Formation of Macrobands in the [001] Nickel Single Crystals // Russian Physics Journal. – 2015. – V. 58. – № 5.
5. Lychagin D.V., Alfyorova E.A., Starenchenko V.A. Effect of crystallographic states on the development of macrobands and deformation inhomogeneity in [111] nickel single crystals // Phys. Mesomech. – 2011. – V. 14. – No. 1-2. – pp. 66–78.
6. Man J., Klapetek P., Man O., Weidner A., Obrtlirk K., Polark. 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 & Philosophical Magazine Letters. – 2009. – № 16. – V. 89. – pp. 1337–1372.
7. Mughrabi H. Cyclic Slip Irreversibilities and the Evolution of Fatigue Damage // Metallurgical and materials transactions. – 2009. – V. 40A. – pp. 1257–1279.
8. Panin V.E., Panin A.V. Effect of the surface layer in a solid under deformation // Phys. Mesomech. – 2005. – V. 8. – № 5-6. – pp. 7–15.
9. Wouters O., Vellinga W.P., Van Tijing R., J.Th.M. de Hosson On the evolution of surface roughness during deformation of polycrystalline aluminum alloys // Acta Materialia. – 2005. – V. 53. – pp. 4043–4050.
10. Zhao Z., Radovitzky R.1, Cuitino A. A study of surface roughening in FEE metals using direct numerical simulation // Acta materialia. – 2004. – V. 52. – № 20. – pp. 5791–5804.