

СКЛАДКООБРАЗОВАНИЕ ПРИ ДЕФОРМАЦИИ ГЦК-МОНОКРИСТАЛЛОВ НИКЕЛЯ

Алфёрова Е.А.^{1,2}, Лычагин Д.В.²

¹Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, e-mail: katerina525@mail.ru;

²Национальный исследовательский Томский государственный университет, г. Томск

Работа посвящена изучению закономерностей складкообразования при пластической деформации на примере монокристаллов никеля. В работе был проведен анализ с применением метода дифракции отраженных электронов (electron backscatter diffraction - EBSD). Складки рассмотрены в областях выпуклости и вогнутости кристалла, что соответствует областям при обработке металлов давлением. Показано, что в области вогнутости материала процессы складкообразования протекают более интенсивно. В этом случае наблюдается более выраженная переориентация локальных областей в сторону более значительного увеличения величины фактора Шмида. Образование складок сопровождается периодичностью пространственного процесса развития переориентации, более выраженной в области вогнутости. Полученные результаты могут использоваться при анализе технологических процессов обработки металлов давлением.

Ключевые слова: пластическая деформация, складки, разориентация.

FOLDING UNDER DEFORMATION OF FCC NICKEL SINGLE CRYSTAL

Alfyorova E.A.^{1,2}, Lychagin D.V.²

¹ National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, e-mail: katerina525@mail.ru;

² National Research Tomsk State University, Tomsk

Article is devoted to the study of patterns of folding during plastic deformation on the example of single crystals of nickel. The article was analyzed using the method of electron backscatter diffraction - EBSD. We considered folds in the convexity and concavity of the crystal in regions corresponding to the pressure treatment of metals. It is shown that in the concavity of the material folding processes proceed more intensively. In this case, a more pronounced orientation towards local areas greater values larger Schmid factor. Accompanied by the formation of folds of the spatial periodicity of the development process of reorientation, more pronounced in the concavity. The results obtained can be used in the analysis process of metal forming processes.

Keywords: plastic deformation, folds, disorientation.

При технологической обработке металлов давлением достаточно часто наблюдается такое нежелательное явление, как складкообразование. Эта проблема характерна для различных видов обработки (штамповка, гнутье труб, ковка и т.д.), как для массивных деталей, так и для тонкостенных. Складки в основном являются технологическими дефектами и нежелательны. Вместе с тем целенаправленное формирование складчатых структур может использоваться при изготовлении деталей особого назначения для микро- и наноустройств, а также в силовых конструкциях автомобилей для обеспечения амортизирующей функции при ударе. Следовательно, складчатые структуры, образующиеся в материале при различных видах силового воздействия, оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на структуру и свойства материала.

В литературе уделяется внимание развитию складчатых структур, например в работах В.В. Губернаторова с коллегами [1-3]. Коллективом показано, что пластическая деформация в очаге течения способствует развитию особого рода неоднородности, который определяется

искажением плоскостности слоев материала, что в дальнейшем приводит к образованию гофрированной структуры [3]. Одной из причин образования гофра называют предположение о потере устойчивости слоями материала, которые подвержены стесненной деформации и действию знакопеременных напряжений на мезоуровне. Показывается, что наличие таких условий способствует формированию гофрированной структуры в любом материале, также и в структурно-однородном (монокристаллы) [3]. В работах [4-5] экспериментально показано, что формирование складчатых структур в ГЦК-монокристаллах является неотъемлемой частью процесса пластической деформации. В экспериментах наблюдается формирование складок микро-, мезо- и макроскопического размера. Кроме того, в работах В.В. Губернаторова отмечено, что формирование гофрированных границ также можно считать одной из причин складкообразования [6]. Было найдено, что в локальных областях после прокатки формируются границы с величиной разориентировки порядка 30° .

В работах академика Панина В.Е. с коллегами поверхностный слой рассматривается как отдельный структурный уровень и процесс складкообразования анализируется с точки зрения физической мезомеханики [9-10].

Интересные результаты приведены в работе зарубежных коллег [8]. Здесь описан процесс формирования складок впереди движущегося клина при выглаживании поверхности. Математическое моделирование процесса позволило сказать, что область складкообразования не выделяется значимым повышением величины деформации, а наибольшая деформация отмечается за клином. Работа [7] посвящена моделированию процесса складкообразования при штамповке листового материала и направлена на прогнозирование формирования складок в зависимости от технологических и конструктивных параметров системы.

Таким образом, исследование процесса складкообразования в металлических материалах имеет фундаментальную и практическую ценность. Вместе с тем установление общих физических закономерностей процесса для многоуровневого анализа пластической деформации и отработки режимов обработки давлением для поликристаллического агрегата затруднено из-за наличия дополнительных факторов (наличие границ зерен, взаимное воздействие зерен и т.д.). В связи с чем целесообразным является выявление и исследование закономерностей процесса складкообразования на монокристаллах.

Целью настоящей работы является изучение закономерностей складкообразования в ГЦК-монокристаллах на примере никеля с ориентацией оси сжатия [111].

Материал и методика

Экспериментальные данные, представленные в работе, получены на монокристаллах никеля, выращенных по методу Бриджмена (примеси менее 0,01%). Образцы имеют форму тетрагональных призм высотой 6 мм и шириной 3 мм. Ориентировка была осуществлена на рентгеновском аппарате ИРИС 3 по эпиграммам с точностью $\pm 1^\circ$. Далее проводили уточнение ориентации на рентгеновском дифрактометре ДРОН-3 (точность $\pm 0,02^\circ$). Поверхность образцов предварительно подготавливали шлифованием на абразивных шкурках и пастах. Заключительным этапом подготовки было электролитическое полирование в насыщенном растворе хромового ангидрида в ортофосфорной кислоте (напряжение 20 В).

Деформация сжатием осуществлялась на испытательной машине Instron ElektroPuls E10000, скорость $1,4 \cdot 10^{-3} \text{ с}^{-1}$. Деформация проводилась при комнатной температуре, для снижения силы трения на торцевых поверхностях применяли графитовую смазку.

Деформационный рельеф изучали на оптическом микроскопе Leica DM 2500P и растровом электронном микроскопе Tescan Vega II LMU с ДОЭ-приставкой для определения величины разориентации локальных областей.

Экспериментальные результаты

Ранее авторами было показано, что для монокристаллов никеля наиболее склонной к складкообразованию является ориентация [111]. Это обусловлено кристаллографическими особенностями и отсутствием у октаэдрических плоскостей свободного выхода на боковые грани [5]. В настоящей работе для исследования закономерностей складкообразования будем использовать монокристаллы никеля с ориентацией оси сжатия [111] и боковыми гранями (110) и (112).

При штамповке образуются места выпуклости и вогнутости металла, имеющие различное напряженное состояние. При модельной деформации монокристалла также можно выделить соответствующие области (рис. 1). И в той и в другой области можно наблюдать складки. Однако их морфология отличается (рис. 1 б, в).

В работе был проведен анализ с применением метода дифракции отраженных электронов (electron backscatter diffraction - EBSD). Съемку осуществляли с грани, перпендикулярной грани со складками, для того чтобы иметь возможность изучить закономерности складкообразования в объеме металла. Грань подготавливалась способом, описанным выше.

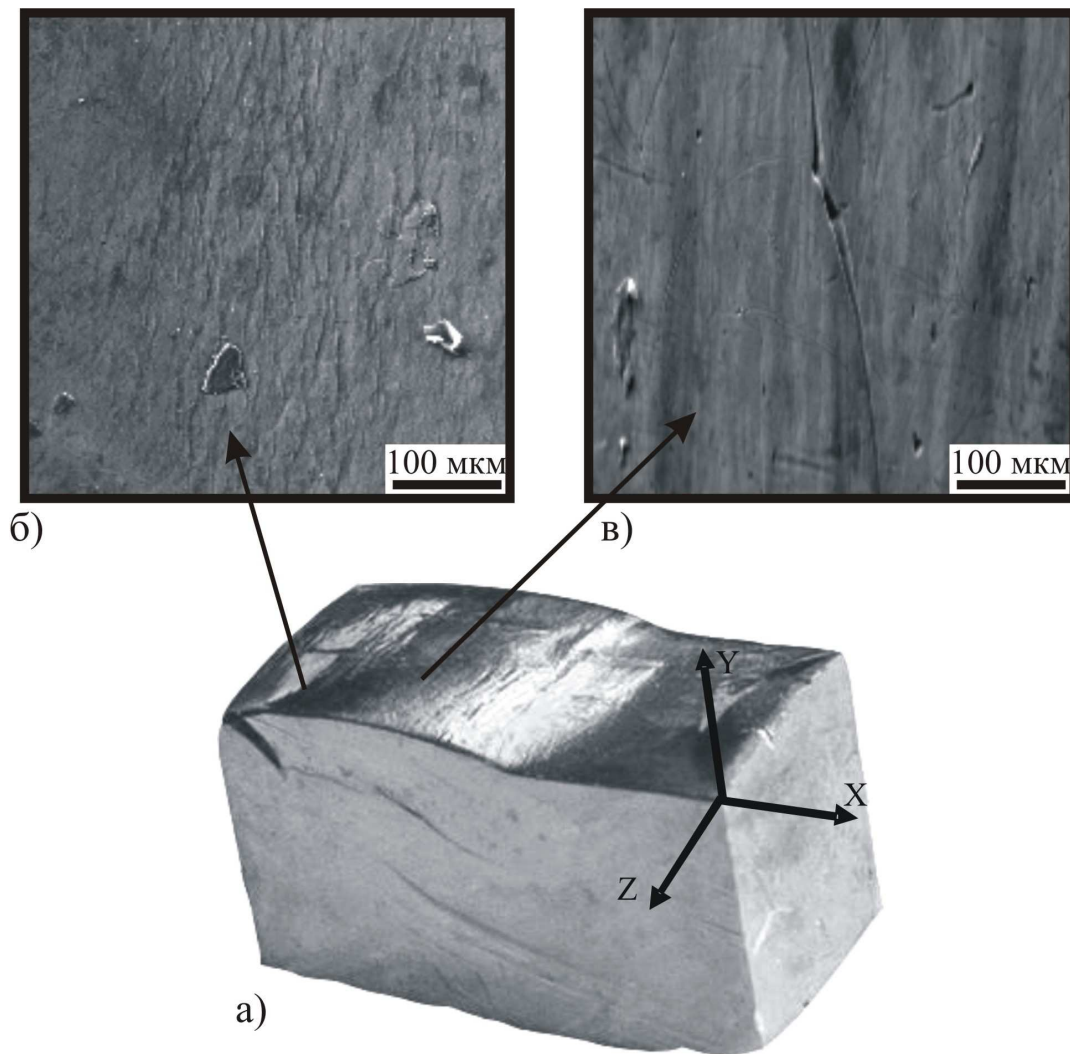


Рис. 1. Ориентация и формоизменение образца (а), морфология складок в области вогнутости (б) и выпуклости (в) после деформации 16%

На рис. 2 показаны карты разориентации локальных областей относительно приложения нагрузки, после деформации 16% в местах выпуклости и вогнутости. Видно, что в области выпуклости (рис. 2а) полосы переориентации выражены слабо и отклонение от исходной ориентации совсем небольшое. Вместе с тем в области вогнутости образца, где схема напряженного состояния сложнее, а выход октаэдрических плоскостей затруднен по геометрическим причинам, переориентация выражена значительно ярче (рис. 2б). Переориентация идет от исходного направления [111] (синий цвет на рис. 2б) в сторону [110] (зеленый цвет на рис. 2б) с промежуточными областями (голубой цвет на рис. 2б). При этом можно наблюдать чередование указанных выше областей. Подобное чередование переориентированных областей также отмечалось и в работах В.В. Губернаторова с коллегами.

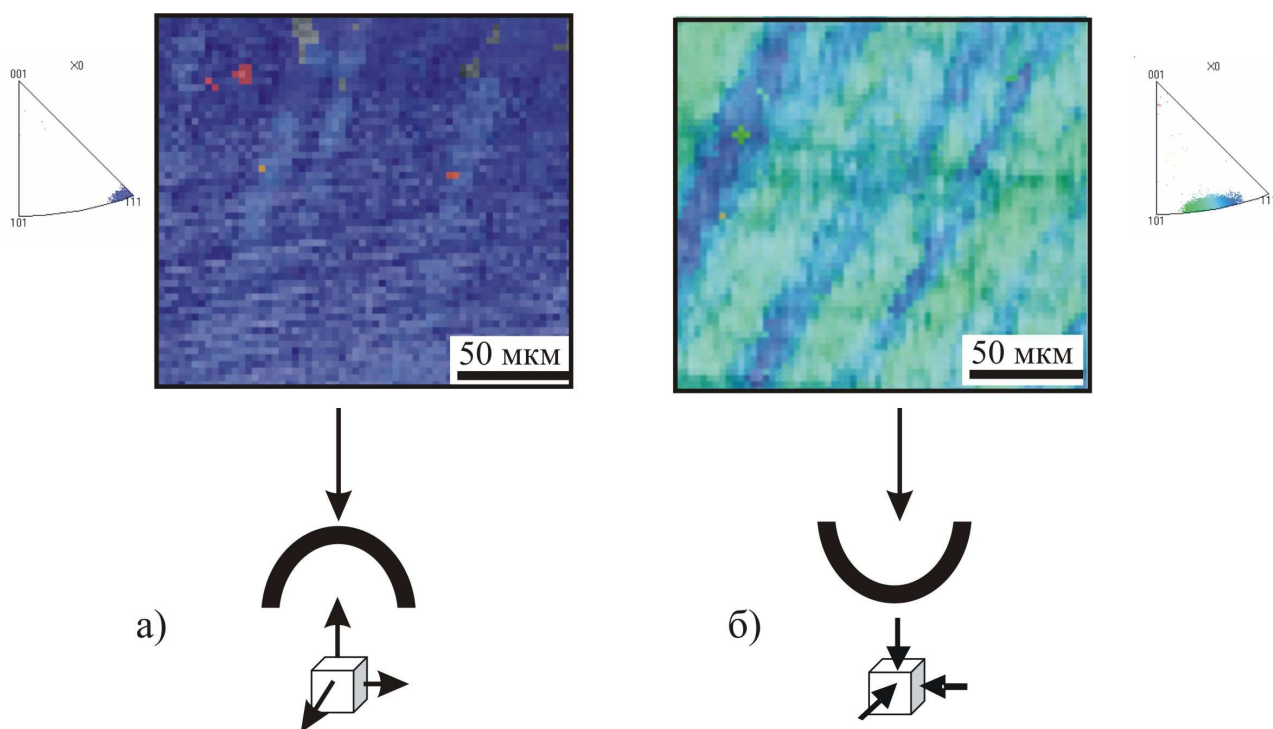
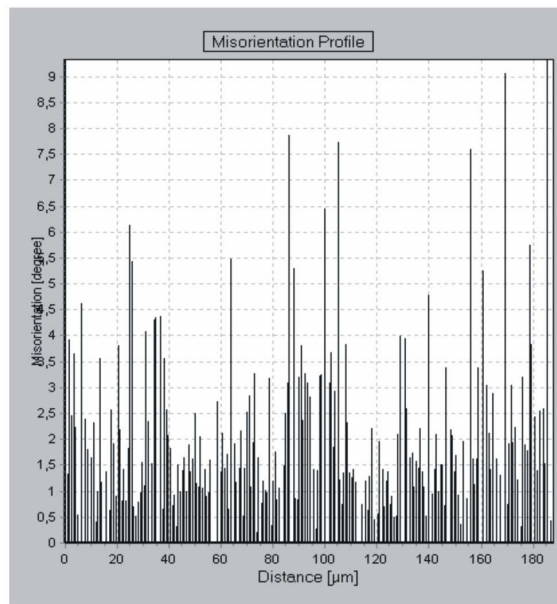
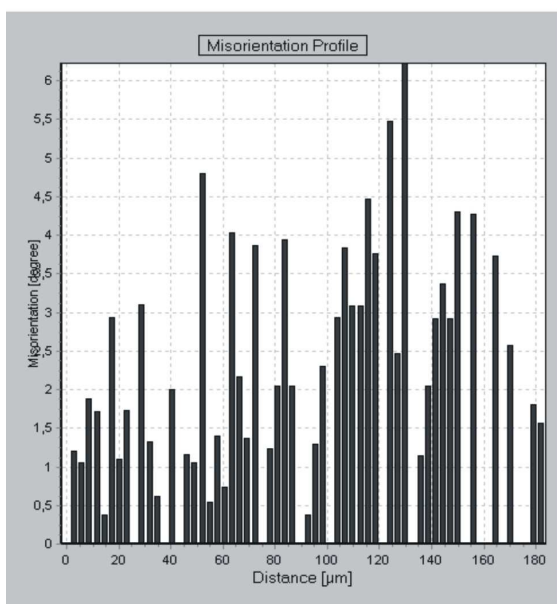
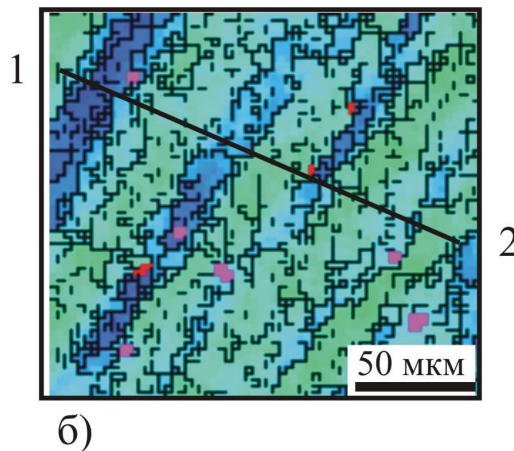
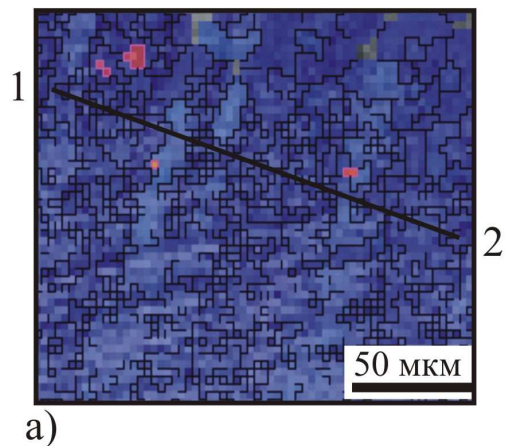


Рис. 2. Карты разориентации относительно оси X и соответствующие им стереографические треугольники в области выпуклости (а) и вогнутости (б) после деформации 16%

На рис. 3 приведено распределение границ разориентации по рассматриваемым участкам и распределение углов вдоль секущих 1-2. Анализ приведенных результатов свидетельствует о том, что в области вогнутости как средние, так и максимальные значения углов разориентации выше по сравнению с областью выпуклости. Вместе с тем и в том и в другом случае наблюдается квазипериодический характер изменения углов. Рассмотрение распределения границ разориентированных областей показало, что в области выпуклости границы распределены беспорядочно, но их почти нет в переориентированных полосах. Значения углов разориентации, при рассмотрении участка в целом, находятся в диапазоне до 10° , а преимущественная величина составляет $2-4^\circ$. Рассмотрение углов разориентации вдоль секущей, расположенной вдоль переориентированных полос, показало, что преимущественная величина разориентации составляет $0,5-1^\circ$, максимальное значение не превышает $3,5^\circ$, аналогичное рассмотрение в областях с ориентацией близкой к исходной показало увеличение максимального угла до 5° и преимущественного до $1,5-2^\circ$. При этом в зоне вогнутости распределение границ также достаточно хаотично, однако можно отметить некоторую тенденцию к их скоплению у границ переориентированных областей. При рассмотрении распределения углов на участке в целом получены данные, аналогичные описанным выше. Однако детальный анализ позволил выявить некоторые отличия. Внутри полос, переориентированных к направлению $[110]$, типичная величина разориентации вдоль секущей, располагающейся внутри полосы, составляет $1-1,5^\circ$,

максимальная не превышает 4° , внутри полос с ориентацией близкой к исходной $[111]$ – $1-1,5^\circ$, максимальная $4,5-5^\circ$.



в)

г)

Рис. 3. Картина переориентации относительно оси сжатия (а, б); распределение углов разориентации вдоль секущих 1-2 (в, г); область выпуклости (а, в), область вогнутости (б, г)

Важным параметром при изучении закономерностей пластической деформации ГЦК-материалов является фактор Шмида, величина которого определяет, какая из систем скольжения начнет действовать первой. Как известно, максимальное значение фактора Шмида равно $0,5$. При исследовании монокристаллов известной кристаллографической ориентации фактор Шмида вполне определен, для поликристаллов каждое отдельное зерно имеет свою величину, и анализ данного фактора затруднен. Для рассмотренной в работе ориентации максимальная величина фактора Шмида до деформации составляет $0,27$. После

нагрузки картина изменилась. В области выпуклости величина фактора Шмида в более переориентированных областях увеличилась до 0,35. В области вогнутости величина фактора Шмида увеличилась до 0,37-0,4 в областях с ориентацией близкой к исходной и до 0,45 в переориентированных к направлению [110] областях.

Таким образом, анализ полученных результатов показал, что процессы складкообразования на вогнутом участке образца идут более интенсивно, чем в области выпуклости. Это объясняется более сложным характером напряжений в области вогнутого участка. При рассмотренной в работе величине деформации 16% именно в этом случае наблюдается более выраженная переориентация локальных областей в сторону более значительного увеличения величины фактора Шмида для обеспечения сохранения целостности металла под нагрузкой. Образование складок сопровождается периодичностью пространственного процесса развития переориентации, более выраженной в области вогнутости.

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

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: 1. Геометрическая модель пластического течения структурно-однородных сред при прокатке // Физическая мезомеханика. – 2001. – № 4. – Т. 5. – С. 97-101.
2. Губернаторов В.В., Соколов Б.К., Гервасьева И.В., Владимиров Л.Р. О формировании полосовых структур в структурно-однородных материалах при деформации // Физическая мезомеханика. – 1999. – Т. 2. – № 1-2. – С. 157-162.
3. Губернаторов В.В., Соколов Б.К., Владимиров Л.Р., Сбитнев А.К., Гервасьева И.В. Новые аспекты течения металла в очаге деформации // Доклады АН. – 1999. – Т. 364. – № 4. – С. 468-470.
4. Лычагин Д.В., Алфёрова Е.А., Старенченко В.А. Влияние кристаллогеометрической установки на развитие макрополос и неоднородность деформации в $[\bar{1}11]$ -монокристаллах никеля // Физическая мезомеханика. – 2010. – Т. 13. – № 3. – С. 75-88.
5. Lychagin D., Chumaevskiy A., Alferova E. Laws of development of deformation folds in [111] copper single crystal at axis compression // Applied Mechanics and Materials. – 2014. – Vol. 682. – P. 448-452.

6. Gubernatorov V.V., Sycheva T.S., Pyatygin A.I. Inhomogeneities of the deformation structure and controlling properties of recrystallized material // *Phys. Met. Metallogr.* – 2003. – V. 96. – Suppl. 1. – P. 28-34.
7. Hamdan M.N., Al-Qaisia A.A., Abdallah S. Parametric Study of Dynamic Wrinkling in a Thin Sheet on Elastic Foundation // *Int. J. of Modern Nonlinear Theory and Application.* – 2012. – V. 1. – P. 55-66.
8. Narayan K. Sundaram, Yang Guo, Srinivasan Chandrasekar Mesoscale Folding, Instability, and Disruption of Laminar Flow in Metal Surfaces // *Phys. Rev. Lettters, PRL.* – 2012. – 109 (10). – Article number 106001.
9. Panin V.E., Panin A.V. Effect of the surface layer in a solid under deformation // *Phys. Mesomech.* – 2005. – V. 8. – No. 5-6. – P. 7-15.
10. Panin A.V. et. al. Formation of mesoscale folded structures on the surface of EK-181 steel polycrystals under uniaxial tension // *Phys. Mesomech.* – 2011. – V. 14. – No. 4. – P. 57-68.

Рецензенты:

Сапожков С.Б., д.т.н., заведующий кафедрой естественно-научного образования Юргинского технологического института национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Юрга;

Петрушин С.И., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Юргинского технологического института национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Юрга.