

Складкообразование на поверхности боковых граней монокристаллов меди при одноосном сжатии и при трении

Лычагин Д.В.^{1,3,†}, Тарасов С.Ю.^{2,3}, Чумаевский А.В.¹

¹Томский государственный архитектурно-строительный университет, пл. Соляная, 2, 634003, Томск

²Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Пр. Академический, 2/4, 634021 Томск

³Национальный исследовательский Томский Политехнический Университет, пр. Ленина 30, 634050 Томск

†dvl-tomsk@mail.ru

Folding on the lateral sides of copper monocrystals loaded by uniaxial compression and friction

D.V Lychagin^{1,3}, S.Yu. Tarasov^{2,3}, A.V. Chumaevskii¹

¹Tomsk State University of Architecture and Building, Solyanaya, 2, 634003, Tomsk

²Institute of Strength Physics and Materials Sciences SB RAS, Academicheskii ave. 2/4, 634021 Tomsk

³National Research Tomsk Polytechnical University, Lenina ave. 30, 634050 Tomsk

Методами растровой и оптической микроскопии исследованы деформационные складки, сформированные на поверхности боковых граней монокристаллов при различных способах испытания. Обнаружено, что формирование складок различного структурно-масштабного уровня происходит по схожим причинам, связанным в основном с искривлением поверхностного слоя грани при образовании наплыва в приторцевой области. При сжатии складки формируются также в областях изгиба на боковых гранях и в местах стыка деформационных доменов.

Ключевые слова: монокристалл, сжатие, трение, складкообразование.

Strain-induced folds on the lateral faces of copper monocrystals generated in compression and sliding tests have been studied using SEM and OM techniques. It has been established that these folds form at different structural scale levels by similar mechanisms related basically to distortion of faces in the vicinity of their end faces during the so-called «lip» formation. Under compression folds have also been formed on the lateral areas bended and on the strain domain boundaries.

Keywords: monocrystal, compression, friction, folding.

1. Введение

Образование складок при деформации одноосным сжатием монокристаллов было выявлено во многих работах [1, 2 и др.]. Кроме того, образование складок отмечено также и при исследовании поликристаллических тел [3]. Складкообразование является одним из дефектов при различных методах обработки, таких, как прокатка, гибка, штамповка и т.д. Закономерности гофрирования и складкообразования при прокатке рассмотрены в работах [4 и др.] Несмотря на эти работы, на настоящее время данное явление изучено недостаточно, хотя в техническом плане определенные эмпирические зависимости, позволяющие снизить складкообразование уже найдены. Такое положение связано со сложным и неоднородным характером пластического течения материала в зоне образования складок, приводящим к появлению на поверхности образца большого количества

различных по виду и масштабному уровню складчатых структур. Для определения физических причин образования складок, прежде всего необходимо установление закономерностей формоизменения поверхностного слоя материала, приводящего к их появлению. Этого можно добиться, сравнивая складчатые структуры, появляющиеся на боковых гранях при различных способах испытания.

Известен факт, что вблизи поверхности трения образуются наплывы (lip), искривляющие поверхность грани в этой области. Подобные наплывы образуются и при сжатии в приторцевой области образцов под влиянием силы трения образца о пуансон испытательной машины, что приводит к реализации в приторцевой области схемы неравномерного всестороннего сжатия. Изучению складок, образующихся как при чистом сжатии, так и при трении посвящена настоящая работа.

Формирование складок изучалось на боковых гранях (110) и $(1\bar{1}2)$ монокристаллов меди, ориентированных так, чтобы направление $[\bar{1}11]$ совпадало с направлением оси сжатия. Деформация сжатием осуществлялась при комнатной температуре со скоростью $3 \times 10^{-4} \text{ c}^{-1}$ до 25% ϵ на испытательной машине Instron ElectroPuls E10000, трение производили по схеме «диск-палец» по кварцевому стеклу без смазки со скоростью 500 мм/м и нормальной нагрузке 12Н на трибометре «TRIBOtechnic».

2. Результаты и обсуждение

Как отмечено выше, в результате деформации в приторцевой области образцов формируются наплывы, или макроскладки (*macrofold* на рис. 1). При сжатии наплывы представляют собой крупные монолитные образования (рис. 1). При трении по схеме «диск-палец» структура наплывов (*lip*) существенно отличается (рис. 2). В нижней части наплывов четко выделяются фрагменты пластинчатого вида (*l* на рис. 1), образовавшиеся предположительно в результате сдвига по торцевой плоскости ($\bar{1}11$), ненагруженной в случае одноосного сжатия. Форма наплывов в поперечном сечении отлична, что обусловлено затрудненностью в перемещении материала вдоль торцевой поверхности относительно пуансонов испытательной машины при сжатии (*cross section* на рис. 1, рис. 2).

При сжатии и при трении по контуру наплыва (*macrofold edge* на рис.1, рис. 2) образуются складки мезомасштабного размера (*mesofold* на рис. 2, рис. 3). В обоих случаях деформации мы имеем дело со сложной, иерархически организованной системой, в которой образование складок на одном масштабном уровне приводит к образованию складок на другом. Такое положение согласуется с современными представлениями об организации деформации в пластически деформируемом твердом теле [5].

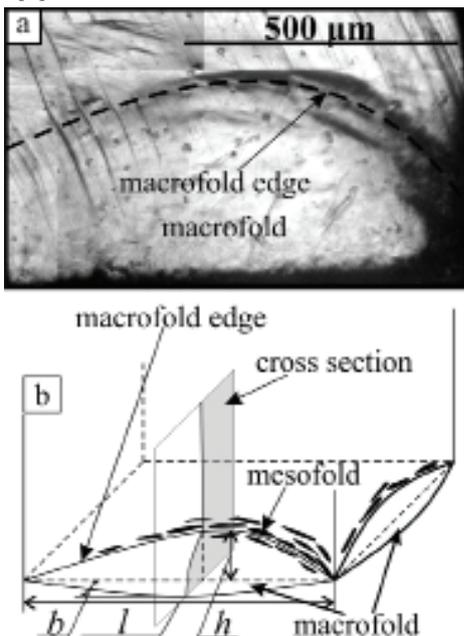


Рис. 1. Наплывы, формируемые при сжатии $[\bar{1}11]$ -монокристаллов (а - снимок, б - схема).

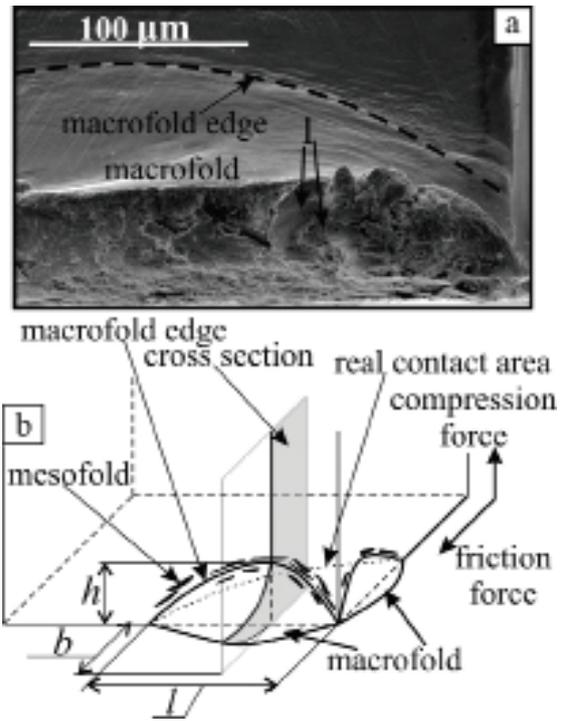


Рис. 2. Наплывы, формируемые при трении по схеме «диск-палец» $[\bar{1}11]$ -монокристаллов (а - снимок, б - схема).

Первый масштабный уровень – макроуровень. Единственная макроскладка на боковой грани – сам наплыв (*macrofold* на рис. 1, рис. 2), имеет размер до 3 мм в длину и до 500 мкм в высоту при сжатии (*l* и *h* на рис.1), и меньшие размеры при трении: ширина до 1 мм, высота до 250-300 мкм (рис. 2). Размер наплыва при сжатии и при трении увеличивается при повышении степени деформации. При сжатии его ширина обусловлена шириной грани, а при трении степень приработки поверхности по этой причине ширина наплывов отличается. При этом наплывы, формируемые при трении выступают от поверхности боковой грани на большую высоту ($b = 100...200 \text{ мкм}$), чем при сжатии ($b < 100 \text{ мкм}$).

Вторым в складкообразовании является мезоуровень. По контуру макроизгиба поверхностного слоя образцов на границе с наплывом формируются ме-

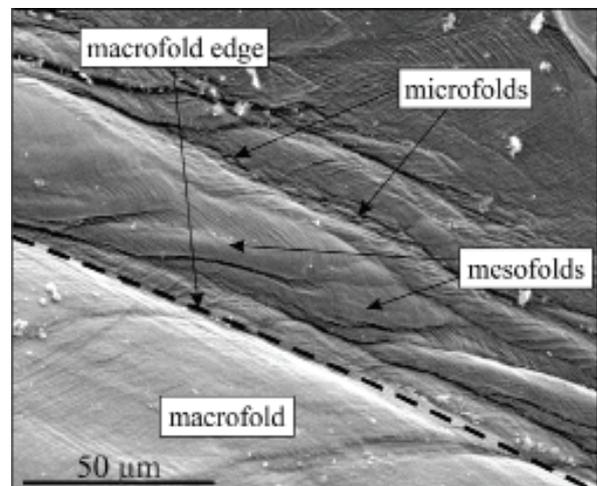


Рис. 3. Складки на грани $(1\bar{1}2)$ $[\bar{1}11]$ -монокристаллов после испытаний на сжатие.

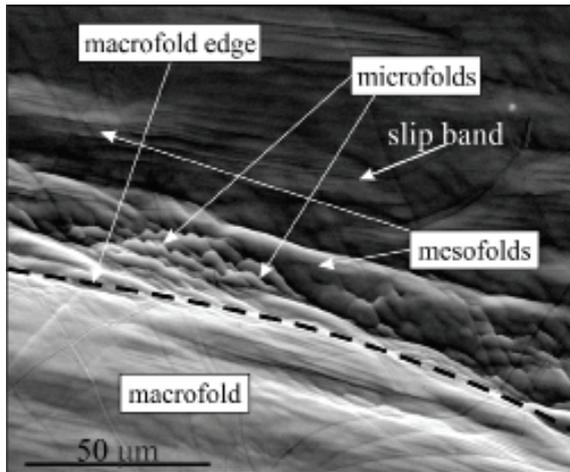


Рис. 4. Складки на грани $(1\bar{1}2) [\bar{1}11]$ -монокристаллов после испытаний на трение.

зоскладки (*mesofolds* на рис. 3, рис. 4), между границ которых образуются микроскладки (*microfolds* на рис. 3, рис. 4).

В складках выделяются следы сдвига по плотноупакованным $\{111\}$ плоскостям, что указывает на дислокационный механизм их образования, при этом положение складок обусловлено не задействованными системами сдвига, а формой границ наплыва. Ширина мезоскладок

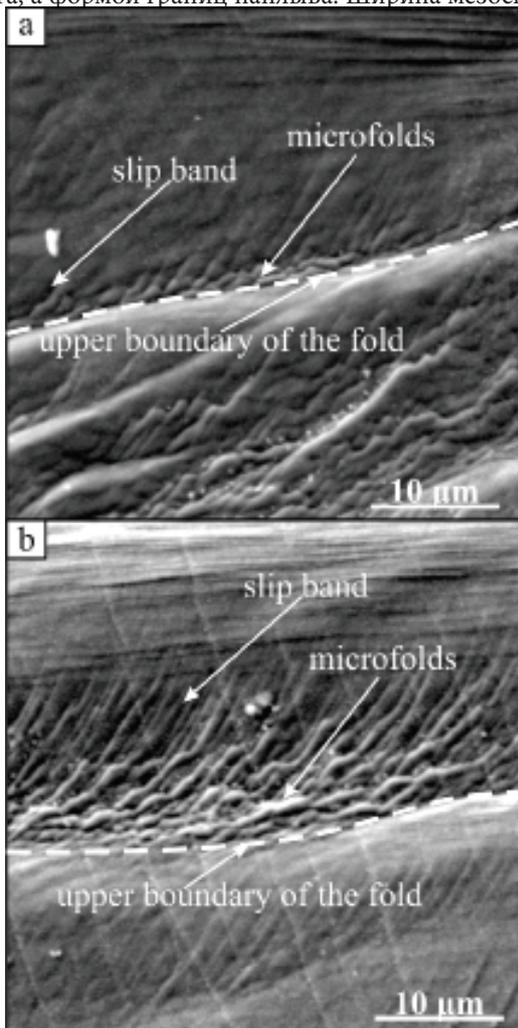


Рис. 5. Образования между складками на гранях $(1\bar{1}2) [\bar{1}11]$ -монокристаллов после испытаний на сжатие

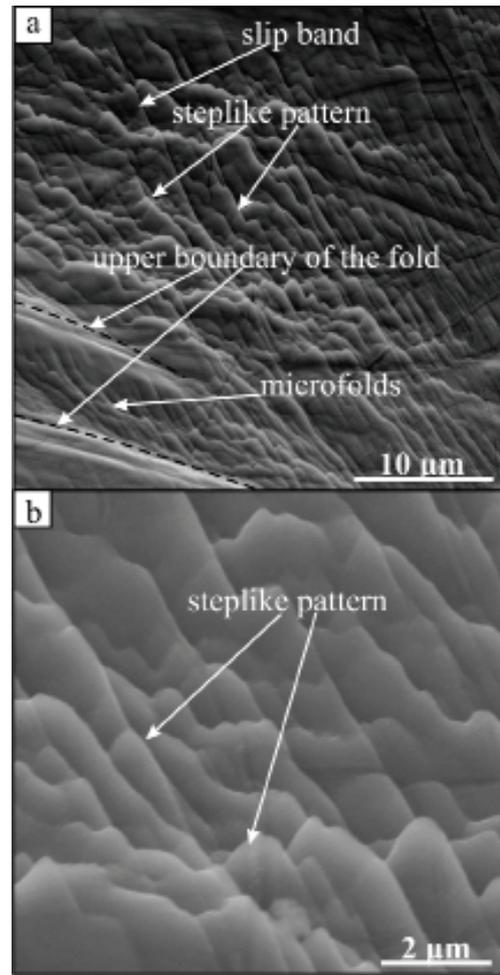


Рис. 6. Образования между складками на гранях $(1\bar{1}2) [\bar{1}11]$ -монокристаллов после испытаний на трение.

находится в пределах от 2 до 2000 мкм, а длина от 10 до 1000 мкм. При сжатии мезоскладки дополнительно подразделяются на мезоскладки I и II-го типов.

Складки, принадлежащие этим типам отличаются друг от друга тем, что крупные мезоскладки I-го типа длиной 70-1000 мкм и шириной 20-200 мкм образуются первично, а мезоскладки II-типа значительно меньших размеров – длиной 10-70 мкм и шириной 7-20 мкм в стесненных условиях между ними.

Третьим в рассмотрении является микроуровень. Его выделение является условным, так как основным признаком при выделении микроскладок было отсутствие в них следов сдвига по причине малого размера, сравнимого с расстоянием между следами: длина – 0,5-10, а ширина – 0,5-2 мкм. Микроскладки, также как и мезоскладки II типа, формируются в стесненных условиях между мезоскладками, т.е. в условиях мезоизгиба поверхностного слоя. Микроскладки образуются группами или системами складок, формируя микроскладчатые структуры, при этом имеется существенное сходство таких структур при сжатии (*microfolds* на рис. 5) и при трении (*microfolds* на рис. 6). Наименьший размер складок в обоих случаях составляет 0,5 мкм, что близко к размеру ячеек в ячеистой дислокационной субструктуре [6]. Микроскладки формируются от нижнего края одной складки до верхнего края другой. Плотность их расположения увеличивается при приближении к верхнему

краю второй складки (*upper boundary of the fold* на рис. 5). Кроме того, они образуются во многих случаях ступенчато, а их появлению предшествует образование следов сдвига (*slip band* на рис. 5). Отдельные структуры относятся к складчатым лишь условно (*steplike pattern* на рис. 6), но имеют общие черты в морфологии со ступенчатыми системами складок (рис. 6). Размер систем микроскладок при сжатии и при трении находится в пределах 8-80 мкм в ширину и 20-350 мкм в длину, что обусловлено размером области их формирования, находящейся между двумя мезоскладками и приблизительно равного размеру самих мезоскладок. Проведенные исследования показывают, что формирование складок на поверхности монокристаллов меди при деформации имеет место при различных способах деформации и обусловлено прежде всего созданием сложных и стесненных условий деформации при искривлении боковой грани. Одной из причин образования складок является формирование наплывов, при этом складки на боковых гранях при трении в других областях не образуются, так как не происходило искривления граней в других областях.

Образование наплывов в обоих случаях имеет схожую природу, отличающуюся только характером трения. В случае сжатия действует сила трения о пуансон испытательной машины, которая приводит к реализации в приторцевой области схемы неравномерного всестороннего сжатия. В случае нагружения трением скольжения наплыв образуется в результате сложной схемы деформации при введения дополнительной оси нагружения, что отличается тем, что сила трения при трении скольжения преодолевается продольным перемещением, а при сжатии нет.

При сжатии $[\bar{1}11]$ -монокристаллов складки формируются в различных частях на поверхности боковых граней. В этом случае, особенность кристаллографической ориентации приводит к искривлению граней монокристалла помимо области формирования наплыва. Наряду с этим имеет место локальное искривление грани, связанное с несовместностью деформации в различных доменах, состоящих из макрополос деформации.

3. Заключение

Сходство микроскладчатых структур, образуемых при сжатии и трении монокристаллов меди обусловлено схожими условиями их формирования, связанными с изгибом поверхностного слоя монокристаллов на мезоуровне и стесненными условиями формирования,

препятствующими росту деформационных складок до мезомасштабного уровня. Минимальный размер деформационных складок находится на уровне размера ячеек дислокационной субструктуры.

Идентичные закономерности процесса складкообразования на мезо- и микроуровне при различных методах нагружения показывают, что образование складок является следствием схожих сдвиговых процессов, происходящих в поверхностном слое при его искривлении на различных структурно-масштабных уровнях. Такие процессы обусловлены помимо схемы напряженно-деформируемого состояния и кристаллографической ориентацией оси нагружения – $[\bar{1}11]$, так как при деформации сжатием и трением монокристаллов с отличной ориентацией складкообразования либо не обнаруживается, либо оно наблюдается в отдельных локальных областях.

Работа выполнена по Проекту III.23.2.1 Разработка научных основ создания мультимодальных функциональных материалов и покрытий триботехнического назначения на основе динамики контактирования поверхностей и при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (договор № 02.G25.31.0063) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 и при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00324, 13-08-98088 p_сибирь_a).

Литература

1. Lychagin D.V., Alfeyorova E.A., Starenchenko V.A. Physical mesomechanics 14(1-2) (2011).
2. D.V. Lychagin, V.A. Starenchenko, Yu.V. Solov'eva Phys. Mesomech., 9, 1-2 (2006).
3. Romanova V.A., Zinov'eva O.S., Balokhonov R.R., Kovalev V.A. Deformatsiya i razrushenie materialov. 5 (2010) 32 (In Russian) [Романова В. А., Зиновьева О. С., Балохонов Р. Р., Ковалев В. А. Деформация и разрушение материалов. 5 (2010) 32].
4. Gubernatorov V.V., Sokolov B.K., Sbitnev A.K., Vladimirov L.R., Gervasyeva I.V. Textures and Microstructures. 32 (14) (1999).
5. V.E. Panin. Physical mesomechanics of solid surface layers // Phys. Mesomech., 2 (6) 5 (1999)
6. Koneva N.A., Starenchenko V.A., Lychagin D.V., Trishkina L.I., Popova N.A., Kozlov E.V. Materials Science and Engineering A, 483-484 (2008).